



**Universidad Nacional de Ingeniería
(UNI)
Facultad de Electrotecnia y Computación
(FEC)**

INGENIERIA ELÉCTRICA

Tesis Monográfica

**“METODO DE ANALISIS DE MEDICIONES DE RESISTIVIDAD DEL
SUELO SEGÚN NORMATIVA IEEE-81-1983”**

Autores:

- Br. Jhonatan Manuel Martínez Solís 2011- 37264
- Br. Elvis Antonio Romero López 2011- 37137

Tutor:

- Ing. Carlos Abraham Pérez Méndez

La vida es y siempre seguirá siendo una ecuación incapaz de resolver, pero tiene ciertos factores que conocemos.

- **Nikola Tesla** -

Dedicatoria

A:

Dios, por darnos la oportunidad de vivir y por estar con nosotros en cada paso que damos, por fortalecer nuestros corazones e iluminar nuestra mente y por haber puesto en nuestro camino a aquellas personas que han sido soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Nuestras Padres, por darnos la vida, querernos mucho, creer en nosotros y porque siempre nos apoyaron. Gracias por darnos una carrera para nuestro futuro.

Nuestro Tutor Ing. Carlos Abraham Pérez Méndez, por su gran apoyo y motivación para la culminación de nuestros estudios profesional y para la elaboración de esta tesis

Finalmente, a los maestros, aquellos que marcaron cada etapa de nuestro camino universitario, y que nos ayudaron en asesorías y dudas presentadas en la elaboración de la tesis.

Agradecimiento

Al inicio de este camino le entregamos nuestro sueños y metas a Dios, y es por eso que queremos agradecerle a Él primeramente porque hoy podemos decir con seguridad que nunca nos dejó solos, a pesar de que hubieron días difíciles a lo largo de nuestra carrera, en los cuales pensamos tirar la toalla, pero Él no lo permitió y nos extendió su mano para continuar.

Agradecemos a nuestros Padres, por sus consejos, sus regaños, sus palabras de ánimos, sus oraciones, su aporte económicos pero sobre todo por enseñarnos a soñar y a creer que todo sacrificio tiene su recompensa.

A nuestro asesor Ing. Carlos Abraham Pérez Méndez, por aportar con muchas ideas, sugerencias, conocimientos teórico, su experiencia y por corregirnos cuando ha sido necesario, y por supuesto por el tiempo que nos ha dedicado, damos infinitos agradecimientos, ya que nos ha ayudado a formular y ejecutar la presente tesis.

Al finalizar un trabajo tan arduo y lleno de dificultades como el desarrollo de una tesis, es inevitable que te asalte un muy humano egocentrismo que te lleva a concentrar la mayor parte del mérito en el aporte que has hecho. Sin embargo, el análisis objetivo te muestra inmediatamente que la magnitud de este aporte hubiese sido imposible sin la participación de personas e empresas que han facilitado las cosas para que este trabajo llegue a un feliz término. Por ello, es para nosotros un verdadero placer utilizar este espacio para ser justos y consecuentes con ellos, expresándoles nuestro agradecimientos.

Contenido

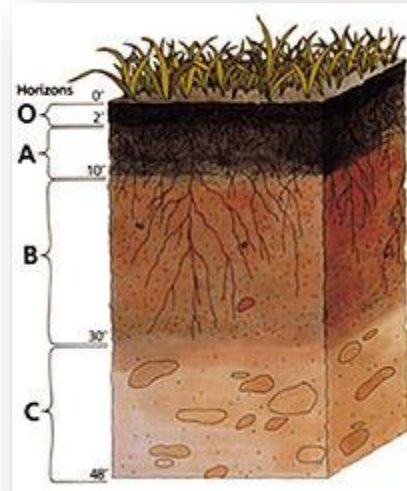
| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Dedicatoria | 3 |
| Agradecimiento | 4 |
| INTRODUCCION | 1 |
| ANTECEDENTES | 3 |
| JUSTIFICACION | 4 |
| OBJETIVOS | 6 |
| OBJETIVO GENERAL | 6 |
| OBJETIVOS ESPECIFICOS | 6 |
| MARCO TEÓRICO | 7 |
| FASE 1: RECOPIACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL SUELO | 9 |
| 1.1 Suelos de Nicaragua | 10 |
| 1.2 Clasificaciones de los Suelos de Nicaragua | 10 |
| 1.2.1 Los de origen volcánico | 10 |
| 1.2.2 Los suelos de tobas, brechas y conglomerados de diversas texturas y composición | 10 |
| 1.2.3 Suelos arcillosos, el sonsocuite, o arcilla negra de los trópicos | 10 |
| 1.2.4 Suelos arenosos ácidos | 11 |
| 1.2.5 Los suelos aluviales | 11 |
| 1.2.6 Los suelos pedregosos o litosuelos | 11 |
| 1.3 Característica de los suelos de Managua, Masaya y La Paz Centro. | 12 |
| 1.3.1 Suelo de Managua | 12 |
| 1.3.2 Suelo de Masaya | 12 |
| 1.3.2.1 Suelos entisoles: | 12 |
| 1.3.2.2 Suelos inceptisoles: | 13 |
| 1.3.2.3 Suelos mollisoles: | 13 |
| 1.3.3 Suelo de La Paz Centro | 14 |
| 1.4 La Resistividad de los Suelos. | 14 |
| 1.4.1 Resistividades Típicas | 15 |
| 1.4.2 Factores que determinan la resistividad de los suelos | 16 |
| 1.4.2.1 Naturaleza de los Suelos | 16 |
| 1.4.2.2 La Humedad | 16 |
| 1.4.2.3 La Temperatura Del Terreno | 17 |
| 1.4.2.4 La Concentración De Sales Disueltas | 17 |
| 1.4.2.5 La Compactación Del Terreno | 18 |
| 1.4.2.6 La Estratificación del terreno | 18 |
| FASE 2: Métodos de Análisis de la Medición del Suelo | 19 |
| 2.1 Método de Muestras de Tierra | 20 |
| 2.1.1 Tipo y cantidad de muestras a tomar | 22 |
| 2.1.2 Sitios de Muestreo | 22 |

| | | |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.1.2.1 | Sistemáticos | 22 |
| 2.1.2.2 | Asistemáticos. | 23 |
| 2.2 | Método de Wenner o 4 Puntos | 23 |
| 2.3 | Método de Schlumberger | 24 |
| 2.4 | Método Deschlumberger - Palmer | 25 |
| 2.5 | Método de Caída de Potencial | 26 |
| 2.5.1 | Regla del 61.8% | 28 |
| 2.6 | Método de Medición de resistencia de una varilla (Variación con la Profundidad) | 28 |
| Fase 3: | Modelo según Normativa de la IEEE - 81-1983 | 30 |
| 3.1 | Modelo de suelo homogéneo | 31 |
| 3.1.1 | Clasificación de los métodos de modelación de los suelos homogéneo. | 31 |
| 3.1.1.1 | Valor Promedio de las Resistividades Medidas: | 31 |
| 3.1.1.2 | Promedio de la medición mínima y la medición máxima de resistividades aparentes: | 32 |
| 3.1.1.3 | Método estadístico de Box Cox: | 32 |
| 3.1.2 | Clasificación de los métodos de modelación de suelo no homogéneo | 33 |
| 3.1.2.1 | Método gráfico de Sunde | 33 |
| 3.1.2.2 | Método del gradiente descendente | 35 |
| 3.2 | Instrumento de Medición | 37 |
| 3.2.1 | El Kyoritsu | 37 |
| 3.2.2 | El fluke 1623 | 39 |
| 3.2.3 | GPS | 40 |
| 3.3 | Estudios de Mediciones del Suelo con sus cálculos. | 41 |
| 3.3.1 | Municipio de Managua | 41 |
| 3.3.2 | Municipio de Masaya | 45 |
| 3.3.3 | Municipio La Paz Centro | 49 |
| Fase 4: | Procedimiento guía recomendado para los Estudios de Resistividad del Suelo según Normativa de la IEEE – 81-1983 | 53 |
| RECOMENDACIONES | | 55 |
| CONCLUSIONES | | 56 |
| ANEXO | | 57 |
| Bibliografía | | 62 |

INTRODUCCION

La importancia de las mediciones de resistividad del suelo y su aplicación en los sistemas de aterrizamiento de equipos eléctricos

El suelo está compuesto por minerales, materia orgánica, diminutos organismos vegetales y animales, aire y agua. Es una capa delgada que se ha formado muy lentamente, a través de los siglos, con la desintegración de las rocas superficiales por la acción del agua, los cambios de temperatura y el viento. Las plantas y animales que crecen y mueren dentro y sobre el suelo son descompuestos por los microorganismos, transformados en materia orgánica y mezclados con el suelo. (**O**=Materia Orgánica, **A**=Suelo, **B**=Subsuelo, **C**=Materia Parental)



El suelo es de naturaleza heterogénea; Varía por su composición y según las condiciones del medio. Aunque se pueden clasificar de diversas formas los suelos por ejemplo en arcilloso, arenosos, y rocosos, no se puede atribuir una resistividad específica a un tipo de suelo, y si se realiza mediciones se pueden encontrar diversos valores de resistividad.

Se puede definir la resistividad del suelo ρ como la resistencia eléctrica entre las caras opuestas de un cubo de dimensiones unitaria (arista= 1m) llenado con suelo. Sus unidades serán Ωm .

- Tipos de Suelos.
- Mezcla de diversos tipo de suelo.
- Suelos con capas estratificadas a profundidades y materiales diferentes.
- Contenido de humedad.
- Temperatura.
- Compactación y presión.
- Composición y concentración de sales disueltos

Los suelos de Nicaragua se han clasificado en órdenes principales dependiendo del origen identificados como molisoles, inceptisoles, aldisoles, ultisoles, vertisoles, entisoles, histosoles entre otros.

Es por eso que muchas veces se hacen análisis dependiendo de las características fisiográficas (relieve), y clima lo que ayuda a definir las condiciones de los suelos en las regiones geográficas.

Fisiográficamente Nicaragua se divide en tres macro-regiones: Pacífica, Central y Atlántica. Todas y cada una de las características de estas regiones ubican los suelos de Nicaragua como los más fértiles y productivos de América Central.

La región Atlántica de Nicaragua, son suelos ácidos e infértiles, pues hay alta pluviosidad, y aquellos elementos que le dan fertilidad al suelo se lavan por la cantidad de agua que corre.

La zona Caribe posee prácticamente, sólo suelos que se han formado por deposiciones de los ríos, son suelos aluviales que se caracterizan como entisoles e insectisoles.

La región central En esta parte del país, se localizan los suelos más fértiles entre montaña y montaña, como los valles de Jalapa (Nueva Segovia), Sébaco (Matagalpa) y Pantasma (Jinotega), donde hay disponibilidad de aguas subterráneas donde se puede desarrollar agricultura intensiva. Los mejores suelos están ubicados en laderas, Hacia el lado de Boaco y Chontales, es zona ganadera por tradición, pero esos suelos son de vocación forestal por la topografía accidentada.

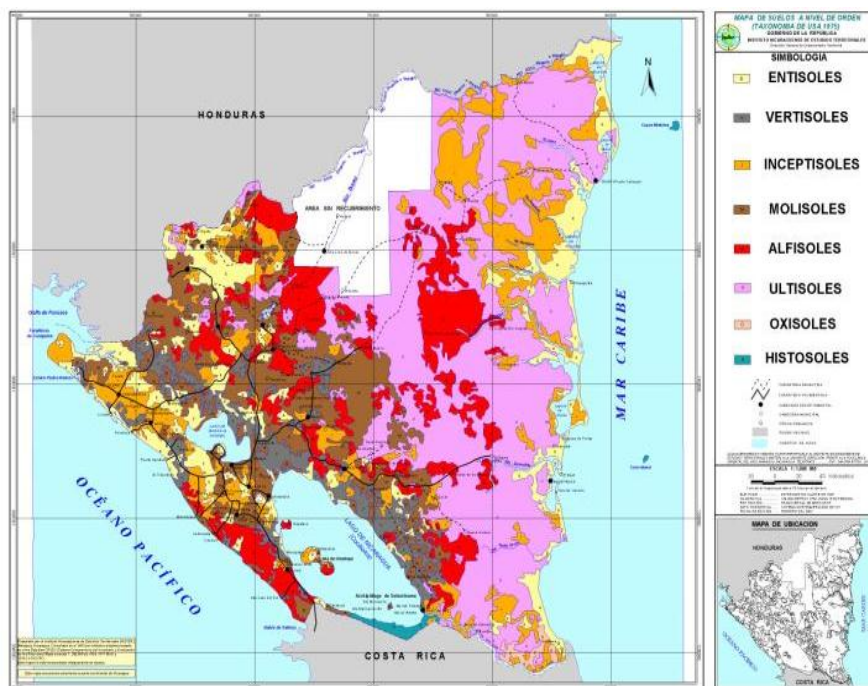


Imagen 1. Mapa de Nicaragua

ANTECEDENTES

Uno de los métodos propuestos para las mediciones de resistividad del suelo, está basado en la normativa IEEE-81-1983 y NOM-022-STPS-1999 se define el término resistividad, como la resistencia que ofrece al paso de la corriente un cubo de terreno de un metro por lado.

La resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste, para conducir electricidad, es conocida además como la resistencia específica del terreno. En su medición, se promedian los efectos de las diferentes capas que componen el terreno bajo estudio, ya que éstos no suelen ser uniformes en cuanto a su composición, obteniéndose lo que se denomina “Resistividad Aparente” que, para el interés de este trabajo, será conocida simplemente como “Resistividad del Terreno”.

El factor más importante de la resistencia a tierra no es el electrodo en sí, sino la resistividad del suelo mismo, por ello es requisito conocerla para calcular y diseñar la puesta a tierra de sistemas y es por eso la vital importancia de un diseño confiable, técnicamente viable y sostenible a largo plazo.

El estudio propuesto, tiene como finalidad principal complementar la formación teórica que reciben los estudiantes de ingeniería eléctrica en la Universidad Nacional de Ingeniería, yendo de la mano con la necesidad de brindar utilidad a todos los recursos que se tienen en ella como son el teluometro, la variedad de terrenos disponibles y la disponibilidad de los laboratorios existentes. Esto conlleva a que exista la necesidad de un método bastante explicito para implementar cada uno de los procedimientos necesarios para obtener la experiencia, la cual es necesaria para el desarrollo aplicado.

JUSTIFICACION

A nivel nacional (Universitario) no existe una metodología propuesta para las mediciones de resistividad del suelo, ya que la que conocemos tradicionalmente es el Método del Dr. Frank Wenner que nos dice que tenemos que insertar 4 electrodos en el suelo en línea recta a una misma profundidad de penetración con cierta distancia.

En la Normativa IEEE-81-1983, implementa un nuevo método para hacer las mediciones de la resistividad de la Tierra. En que nos habla que con un Electrodo enterrado a una cierta profundidad de la tierra le aplicamos corriente, para que podamos medir el voltaje y la potencia que estará recibiendo dicho suelo, y así poder calcular la resistividad de dicho suelo.

El sistema de puesta a tierra provee un camino de baja impedancia para drenar la corriente de falla de tierra, corrientes de fuga y disturbios presentes en las redes de energía eléctrica.

Un buen sistema de puesta a tierra es necesario para mantener buenos niveles de seguridad del personal, operación de los equipos y desempeño de los mismos, ya que si no se cuenta con un buen sistema de tierra, se presentan riesgos de sufrir un accidente o daño a los equipos eléctricos dentro de una instalación eléctrica ocasionada por desbalance de fases, descargas atmosféricas, corrientes de fuga, etc.

Porque se hacen las mediciones.

1. Evitar sobre voltajes que dañen los equipos
2. Evitar pérdidas de vidas humanas.
3. Limitar la tensión que presentan las masas metálicas respecto a tierra
4. Eliminar o disminuir el riesgo que supone una avería en el material eléctrico utilizado.
5. Asegurar actuación de las protecciones.

Debido a la importancia que tiene un sistema de tierras dentro de una instalación eléctrica, se presenta la necesidad de llevar a cabo un riguroso estudio alrededor de un método de análisis de resistividad del suelo, para proponer posibles soluciones, confiables y seguras garantizando con esto que los sistemas eléctricos estén sólidamente aterrizados, así como proponer mejoras a sistemas ya existentes.

Se debe aclarar que no todos los instrumentos de medición de tierra se utilizarán de igual manera debido a la configuración y la estructura electrónica de ellos; sin embargo, los métodos que utilicen deben ser fundamentados en los estipulados por la normativa estándar. Teniendo presente que esta guía se fundamenta en el instrumento de medición de tierra que se tiene en la universidad actualmente, las experiencias están

realizadas con base a este. Al momento de utilizar algún otro instrumento de mediciones de tierra se debe considerar el manual que se tenga para ese instrumento.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Elaborar un documento de referencia según la normativa IEEE-81-1983 de las mediciones de resistividad del suelo, para los Estudiantes y/o profesionales.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar detalladamente los métodos utilizados para medir la resistividad del suelo donde se va a trabajar.
- Utilizar estudios de casos anteriores de mediciones de resistividad de suelos y proponer una nueva metodología destinada a este proceso.
- Elaborar un documento base según los resultados de la metodología presentada y analizada.

MARCO TEÓRICO

Los Sistemas de puesta a tierra son una parte imprescindible de todo sistema eléctrico en cualquiera de sus niveles: Generación, Transmisión y Distribución de la energía, pues es el que protege al sistema, personas y equipos conectados. Desde su diseño e implementación hasta su mantenimiento se deben seguir las normas correspondientes que garanticen el cumplimiento de los principales objetivos de las puestas a tierra.

Conocer en teoría la composición exacta del suelo es de suma importancia ya que a medida de un conocimiento detallado de cada elemento que lo compones se establece las condiciones ideales cuando se trata de realizar una conexión de derivación a tierra

Dichos componentes son los siguientes:

Sales solubles: La resistividad del suelo es determinada principalmente por su cantidad de electrolitos; esto es, por la cantidad de humedad, minerales y sales disueltas. Como ejemplo, para valores de 1% (por peso) de sal (NaCl) o mayores, la resistividad es prácticamente la misma, pero, para valores menores de esa cantidad, la resistividad es muy alta.

Composición del terreno: La composición del terreno depende de la naturaleza del mismo. Por ejemplo, el suelo de arcilla normal tiene una resistividad de 40-500 ohm-m por lo que una varilla electrodo enterrada 3 m tendrá una resistencia a tierra de 15 a 200 ohm respectivamente. En cambio, la resistividad de un terreno rocoso es de 5000 ohm-m o más alta, y tratar de conseguir una resistencia a tierra de unos 100 ohm o menos con una sola varilla electrodo es virtualmente imposible.

Estratigrafía: El terreno obviamente no es uniforme en sus capas. En los 3 m de longitud de una varilla electrodo típica, al menos se encuentran dos capas diferentes de suelos. En XX se encuentran ejemplos de diferentes perfiles de resistividad.

Granulometría: Influye bastante sobre la porosidad y el poder retenedor de humedad y sobre la calidad del contacto con los electrodos aumentando la resistividad con el mayor tamaño de los granos de la tierra. Por esta razón la resistividad de la grava es superior a la de la arena y de que ésta sea mayor que la de la arcilla.

Estado higrométrico: El contenido de agua y la humedad influyen en forma apreciable. Su valor varía con el clima, época del año, profundidad y el nivel freático. Como ejemplo, la resistividad del suelo se eleva considerablemente cuando el contenido de humedad se reduce a menos

del 15% del peso de éste. Pero, un mayor contenido de humedad del 15% mencionado, causa que la resistividad sea prácticamente constante. Y, puede tenerse el caso de que en tiempo de secas, un terreno puede tener tal resistividad que no pueda ser empleado en el sistema de tierras. Por ello, el sistema debe ser diseñado tomando en cuenta la resistividad en el peor de los casos.

Temperatura: A medida que desciende la temperatura aumenta la resistividad del terreno y ese aumento se nota aún más al llegar a 0° C, hasta el punto que, a medida que es mayor la cantidad de agua en estado de congelación, se va reduciendo el movimiento de los electrolitos los cuales influyen en la resistividad de la tierra

Compactación: La resistividad del terreno disminuye al aumentar la compactación del mismo. Por ello, se procurará siempre colocar los electrodos en los terrenos más compactos posibles.

Telurómetro: es un aparato que nos permite realizar la medición de un SPAT para comprobar su correcto funcionamiento siendo así el principal indicador del estado del mismo.

FASE 1: RECOPIACION DE LAS CARACTERISTICAS DEL SUELO

1.1 Suelos de Nicaragua

Los suelos del Pacífico de Nicaragua son de origen volcánico reciente, y localmente han sido afectados por erupciones durante los últimos 10,000 años. Los suelos volcánicos son todos fértiles, aunque en realidad son muy variables en calidad. Su fertilidad depende tanto de la naturaleza del material volcánico original como de su susceptibilidad hacia los procesos principales de la formación de suelos.

Los suelos de Nicaragua se han clasificado en órdenes principales dependiendo del origen identificados como: molisoles, inceptisoles, alisoles, ultisoles, vertisoles, entisoles, histosoles entre otros.

También existe otra clasificación, que es la combinación de suelos y climas, lo que sirve para definir el uso potencial del mismo en la planificación agropecuaria, es por eso que muchas veces se hacen análisis dependiendo de las características fisiográficas (relieve), y clima lo que ayuda a definir las condiciones de los suelos en las regiones geográficas.

1.2 Clasificaciones de los Suelos de Nicaragua

1.2.1 Los de origen volcánico: recientemente formados por materiales arrojados durante las erupciones, llevadas por el viento o arrastradas por las corrientes y depositados en los alrededores. Son suelos permeables y ricos en minerales básicos, considerados como ideales para actividades agrícolas, cubren extensas llanuras del occidente del país.

1.2.2 Los suelos de tobas, brechas y conglomerados de diversas texturas y composición: son muy comunes en la región central del país. Se formaron de antiguos materiales de origen volcánico, depositados o arrastrados al fondo de valles y llanuras, donde sus partículas se aglutinaron y consolidaron para formar cascajos y terrones. Su fertilidad es mediana a baja.

1.2.3 Suelos arcillosos, el sonsocuite, o arcilla negra de los trópicos: son los que resultan de la descomposición lenta de las rocas madres, alteradas por la acción prolongada de la intemperie. Estos suelos forman un lodazal tenaz en la época de lluvias, pero se seca, agrieta y desmorona en el verano. Es muy abundante en los llanos, junto al mar y alrededor de los lagos. Sobre él crece una vegetación pobre, raquítica y matorralosa como distintivo, el arroz es el único cultivo que prospera en este suelo. Otro tipo de suelo arcilloso es el barro rojo o laterita común en las regiones muy lluviosas, como en la costa atlántica. Sus minerales solubles han sido lavados por las lluvias y acarreados a profundidad, por lo cual no son buenos para la agricultura. Casi

todos los suelos forestales cubiertos por bosques húmedos tropicales son de este tipo.

1.2.4 Suelos arenosos ácidos: Son los producidos por la disgregación de ciertas rocas que contienen silicio, en este caso el granito que suelta cuarzo en forma de gravas, tal como se observa en los terrenos de nueva Segovia, en la amplia sabana miskita, al norte de puerto cabezas, la cual fue formada por la emersión de terrazas marinas, donde una vez las olas molieron este tipo de arena. Tanto en un lugar como en el otro predominan los pinos, que parecen crecer mejor sobre estos suelos arenosos ácidos.

1.2.5 Los suelos aluviales: se forman por el arrastre de materiales desde las partes altas a las bajas, vale decir de las montañas a los valles y llanuras, donde se depositan en varias capas o aluviones; su fertilidad depende de su compactación y calidad de los materiales que lo integran. Junto a los ríos y costas se depositan lodos y limos buenos para la agricultura.

El valle de Managua está constituido por diversos aluviones que descendieron de las sierras, cuyas capas distintas se observan en los cortes de causes y cañadas, a veces intercalados volcánicos parecidos.

1.2.6 Los suelos pedregosos o litosuelos: son resultado de la erosión profunda de mantos superficiales, al extremo de dejar descubierta la roca madre del subsuelo y revestido el campo de piedras de distintos tamaños. En la región central del país han quedado al descubierto muchos cerros “pelados”, sembrados de piedras, como resultado de la deforestación, quemas y otras malas prácticas agrícolas, que removieron los suelos que los recubrían. También se consideran litosuelos los formados por corrientes de lava, al pie de los volcanes, especialmente el mal país o piedra quemada.

Nicaragua en resumen es un país con topografía frágil, variados suelos y condiciones geológicas y climáticas muy activas. Estas situaciones pueden transformar su geografía si el productor agropecuario no aprende a usar mejor los suelos, las aguas y a manejar racionalmente los recursos forestales.

1.3 Característica de los suelos de Managua, Masaya y La Paz Centro.

1.3.1 Suelo de Managua

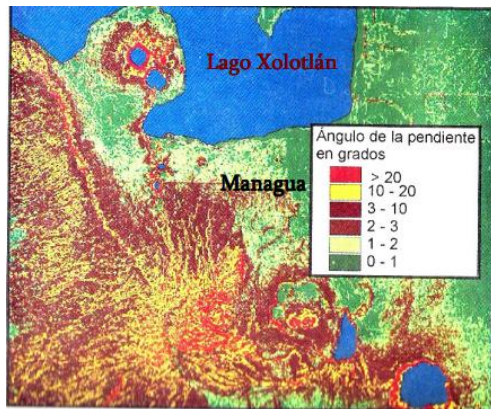


Imagen 2. Pendientes del Terreno en Managua

La Ciudad de Managua se asienta en una superficie plana que se inclina suavemente hacia el lago Xolotlan (ver imagen 2); inclinación interrumpida en varios lugares por altozanos, la mayoría de origen volcánica (Cráteres Tiscapa, Nejapa, Asososca, Valle Ticomio y otros)

Los suelos se clasifican como limos no cohesivos, arenas y gravas, de pobre a bien consolidados y con diferentes grados de cementación, presentando por lo general bajas densidades y alta porosidad.

El Subsuelo de Managua es relativamente homogéneo y su comportamiento dinámico es bueno durante eventos sísmicos, en vista que no ocurrieron grandes efectos geológicos.

1.3.2 Suelo de Masaya



Imagen 3: Mapa del Departamento de Masaya

Los suelos del departamento de Masaya son de origen volcánico: lava, cenizas y lodo volcánico en Nindirí y La Concepción; pómez a orillas de la laguna de Apoyo y aluviones en la llanura de Tisma, arrastrados desde las alturas volcánicas al sur. Esta característica hace que los suelos del departamento se dividan en tres tipos:

1.3.2.1 Suelos entisoles:

Estos suelos se encuentran en los alrededores del Volcán Masaya y partes de los municipios de La Concepción, Masatepe, Nandasmo, Nindirí y Niquinohomo. Son suelos minerales de formación reciente, de profundos a muy superficiales, relieve de plano a muy escarpado y fertilidad alta a baja. Las texturas tanto superficial como del subsuelo varían de arenosas a arcillosas. El contenido de materia orgánica es variado. Su uso adecuado es forestal o vegetación natural, variedades de pastos adaptables a las condiciones y conservación de la flora y la fauna. Estos suelos no son recomendables para cultivos agrícolas.

1.3.2.2 Suelos inceptisoles: Se localizan en la Meseta de Los Pueblos, parcialmente en los municipios de La Concepción, Masatepe, Nandasmo y Niquinohomo. Son suelos minerales de desarrollo incipiente, de poco profundos a muy profundos, relieve de plano a muy escarpado y fertilidad de muy baja a alta. Las texturas superficiales son de arena franca hasta arcillosa, con ausencia de estructura de roca por lo menos en la mitad del volumen. El subsuelo varía entre franco arcilloso y franco arcillo arenoso.

El contenido de materia orgánica es variado. Estos suelos son aptos para cultivos como algodón, ajonjolí, cacao, maní, maíz, hortalizas, banano, plátano, piña, café, cítricos. En algunos casos por riesgo o susceptibilidad de los suelos a la erosión hídrica y/o eólica se recomiendan para bosques o reforestación en su defecto. Son aptos para cultivos anuales perennes y bosques, en pendientes menores a 15%. Los territorios con hasta 30% de pendiente son aptos para silvopastura, agroforestería y bosques, en pendientes de hasta 50% son aptos para agroforestería y bosque y donde rebasan el 50%, son aptos para bosque de protección y conservación.

1.3.2.3 Suelos mollisoles: Se localizan en parte del municipio de Nindirí y en la Llanura de Tisma. Son suelos minerales con estado de desarrollo incipiente, joven o maduro, de poco profundos a muy profundos, desarrollados a partir de depósitos aluviales y lacustres sedimentados de origen volcánico, rocas básicas, ácidas, metamórficas, sedimentarias y piroclásticas, además de fertilidad de baja a alta.

Las texturas del suelo y subsuelo varían de franco arenoso a franco arcilloso. Son ricos en humus, suaves en seco, con subsuelo formado por acumulación de arcilla aluvial. El contenido de materia orgánica es de muy bajo a alto, lo que indica que estos suelos son aptos para cultivos de algodón, ajonjolí, maní, maíz, sorgo, arroz, caña de azúcar. Los cultivos son adecuados en pendientes del 0% al 15%. Los suelos con rango de 15 a 30% son apropiados para cultivos de pastos, piña, algunos frutales, silvopasturas, agroforestería y bosque. Los suelos con pendientes del 30% al 50% son aptos para bosques de explotación, bosque de protección, bosque de conservación y para agroforestería. Los que poseen pendientes mayores al 50% son apropiados únicamente para bosque de protección y conservación de la flora y fauna.

1.3.3 Suelo de La Paz Centro



Los Suelos de La Paz Centro se caracterizan por ser suelos que van de profundos a moderados superficiales, de color rojizo con subsuelos arcillosos que se derivan de cenizas volcánicas, siendo ricos en minerales básicos se encuentran en las planicies con pendientes casi planas y onduladas.

Los suelos predominantes en el municipio son arena franca muy fina, franco arenoso, franco

Imagen 4: Mapa del municipio de la Paz Centro fina, franco arenoso, franco arcilloso, franco limoso y limo, arcillo arenoso, arcillo limoso con menos del 60% de arcilla y las arcillas pesadas (Vertisoles mayor del 60 de arcilla) estos suelos se encuentran distribuidos en todo el territorio existiendo áreas específicas de localización. Así se tiene que en la parte sur y sureste del munición predominan los suelos Vertisoles; al oeste suelos con textura moderadamente finas (arena franca muy fina, franco arenoso, franco arcilloso, franco limoso y limo, arcillo arenoso, arcillo limoso) en la parte noreste, los suelos específicamente en la comarca momotombo los suelos son arenosos que se han desarrollado a partir de sedimentos aluviales y lacustre. **(Ver imagen 4).**

1.4 La Resistividad de los Suelos.

Las resistividades de los suelos se expresan en Ω -m, Ω -cm ó Ω -mm, que corresponde a la resistencia que presenta un cubo de 1 metro cubico de suelo o aguas, entre sus paredes laterales (arista) y se representa por la letra griega “ ρ ”.

RESISTIVIDAD DE UN CUBO DE TERRENI DE 1M DE ARISTA

Dónde:

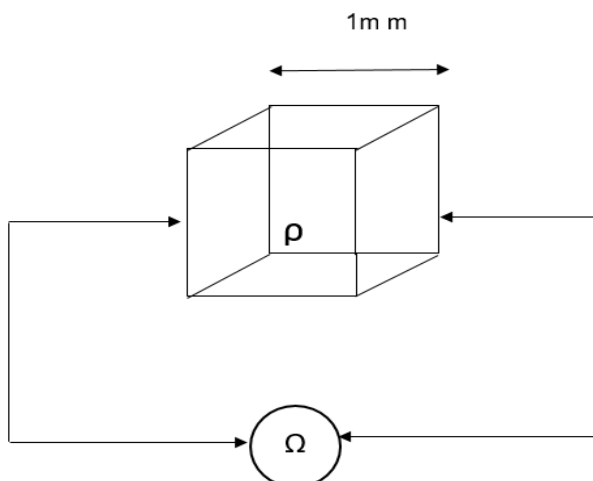
Dimensiones de ρ :

$$\mathbf{R} = \rho \frac{1}{S}$$

$$\rho = \frac{KS}{1} \longrightarrow \left(\frac{\Omega m^2}{m} \right) = \Omega m$$

Para un cubo de 1m de lado:

$$R(\Omega) = \rho \frac{1(m)}{s(m^2)} = \rho \frac{1(m)}{(1 \times 1)m^2} = \frac{\rho}{1m}$$

Despejando ρ , $\rho = R \ (\Omega \text{ m})$ 

1.4.1 Resistividades Típicas

Tabla 1

| Naturaleza del Terreno | Resistividad Ohmios-m |
|---------------------------------------|-----------------------|
| Terreno Pantanoso | Hasta 30 |
| Limo | 20 a 100 |
| Humos | 10 a 150 |
| Turbas Húmedas | 5 a 100 |
| Arcilla Plástica | 50 |
| Margas y Arcillas Compactas | 100 a 200 |
| Margas De Jurásico | 30 a 40 |
| Arena Arcillosa | 50 a 500 |
| Arena Silíceea | 200 a 3000 |
| Suelo Pedregoso Cubierta de césped | 300 a 500 |
| Suelo Pedregoso Desnudo | 1500 a 3000 |
| Caliza Blanda | 100 a 300 |
| Caliza Compacta | 1000 a 5000 |
| Caliza Agrietada | 50 a 300 |
| Pizarra | 800 |
| Rocas y Gres Procedente De Alteración | 1500 a 10000 |
| Granito y gres muy alterados | 100 a 600 |

Los valores medidos de resistividad de terrenos se muestran en el siguiente cuadro:

| Naturaleza del Terreno | Valor medio de la resistividad (Ohm-m) |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Terreno cultivable y fértil, Terraplenes Compactos y Húmedos. | 50 |
| Terreno cultivable poco fértil, Terraplenes en general. | 500 |
| Suelos Pedregosos Desnudos Arenas Secas Permeables. | 3000 |

Tabla 2

La tierra representa generalmente un mal conductor (gran contenido de óxido de silicio y óxido de aluminio que son altamente resistivos) pero gracias al amplio volumen disponible, se puede lograr a través de ella los niveles conductivos necesarios para su utilización auxiliar.

1.4.2 Factores que determinan la resistividad de los suelos

1.4.2.1 Naturaleza de los Suelos

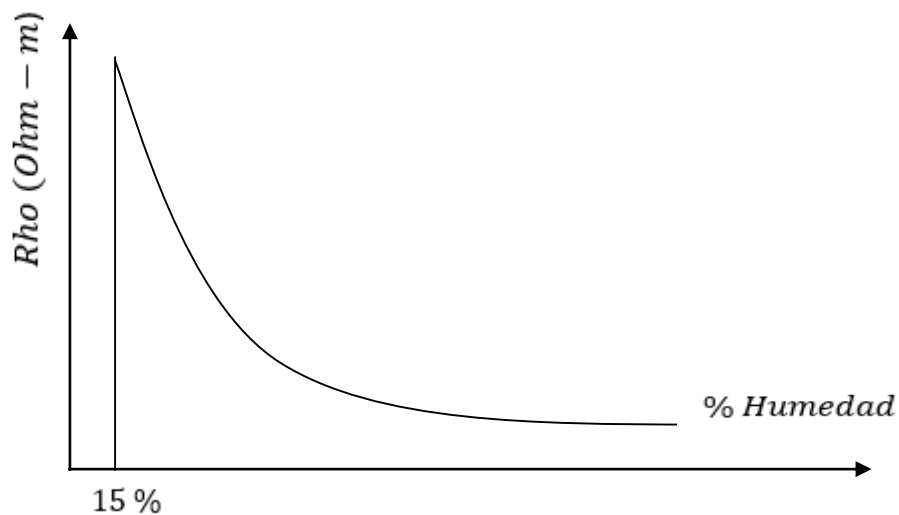
Los suelos son buenos, regulares o malos conductores de la electricidad en función de su naturaleza. El análisis y conocimiento de esta naturaleza es el primer paso para la instalación adecuada del sistema de puesta a tierra.

Tabla 3

| Tipos de suelos agua | Valor típico de resistividad ($\Omega\cdot m$ -) |
|----------------------|---------------------------------------------------|
| Agua de Mar | 2 |
| Arcilla | 40 |
| Agua subterránea | 50 |
| Arena | 2000 |
| Granito | 25000 |
| Hielo | 100000 |

1.4.2.2 La Humedad

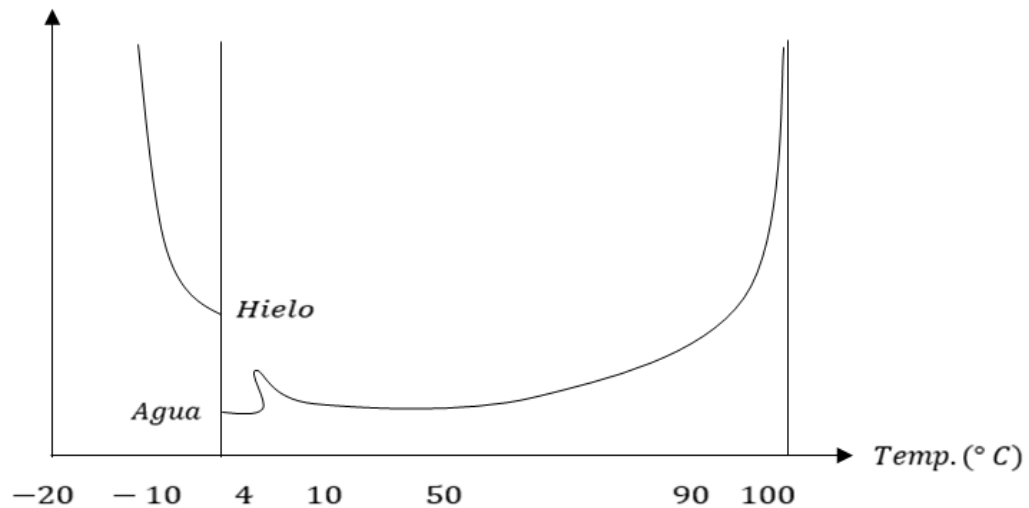
La resistividad que presenta un terreno está en relación directa a los porcentajes de humedad contenida en él; es decir, depende de su estado hidrométrico, al aumentar la resistividad y al disminuir la humedad aumenta la resistividad. En todos casos siempre que se añade agua a un terreno disminuye su resistividad respecto al que tendría en seco.



Gráfica 1. Humedad

1.4.2.3 La Temperatura Del Terreno

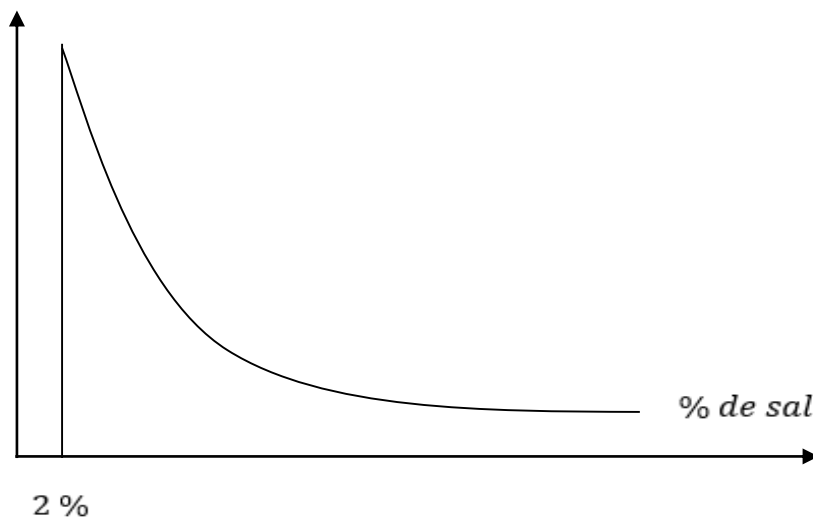
La resistividad de los suelos, también depende de la temperatura, esta característica térmica del terreno depende de su composición, de su grado de compactación y del grado de humedad.



Gráfica 2. La Temperatura del Terreno

1.4.2.4 La Concentración De Sales Disueltas

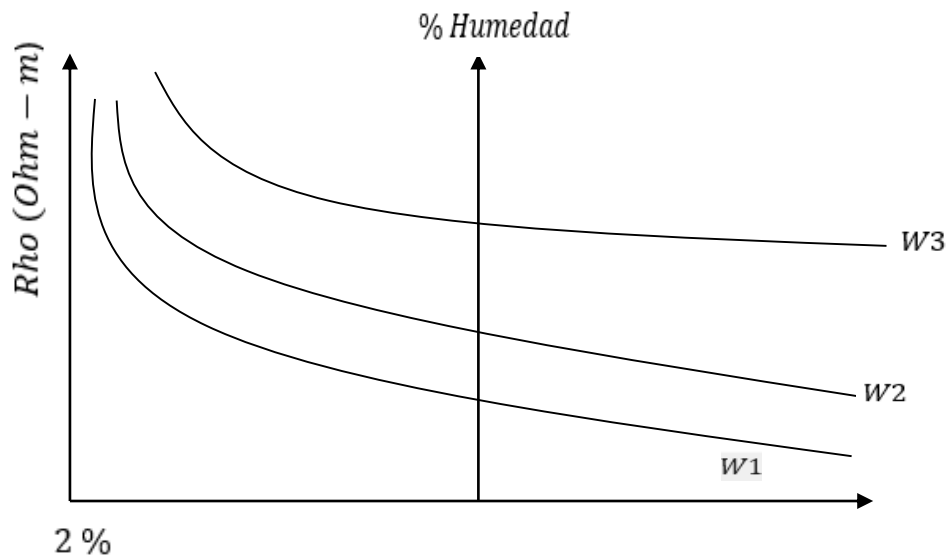
Al presentarse una mayor concentración de sales disueltas en un terreno, mejora notablemente la conductividad y por lo tanto la resistividad.



Gráfica 3. La Concentración de Sales Disueltas

1.4.2.5 La Compactación Del Terreno

Cuando se introducen electrodos de pica con una máquina de penetración, se producen vibraciones que provocan una separación entre la pica y el terreno. Por esta razón, se aconseja compactar el terreno para que haya un buen contacto entre el electrodo y el terreno.



Gráfica 4. La Compactación del Terreno

1.4.2.6 La Estratificación del terreno

El suelo está formado por capas (estratos) que tienen diferentes resistividades y profundidades debidas a la formación geológica son generalmente horizontales y paralelos a la superficie. Existen estratos que se presentan en forma inclinada o vertical debido a fallas geológicas, pero para los estudios se asumen horizontales.

FASE 2: Métodos de Análisis de la Medición del Suelo

La resistividad del terreno se mide fundamentalmente para encontrar la profundidad y grueso de la roca en estudios geofísicos, así como para encontrar los puntos óptimos para localizar la red de tierras de una subestación, sistema electrónico, planta generadora o transmisora de radiofrecuencia.

En este punto es necesario aclarar que la medición de la resistividad del terreno, no es requisito para hacer una malla de puesta a tierra. Aunque para diseñar un sistema de tierras de gran tamaño, es aconsejable encontrar el área de más baja resistividad para lograr la instalación más económica.

El perfil de la resistividad del suelo determinará el valor de la resistencia a tierra y la profundidad de nuestro sistema de puesta a tierra.

2.1 Método de Muestras de Tierra

Este método se denomina de dos electrodos o de cuatro electrodos. El primero de ellos se basa fundamentalmente en medir la resistencia R de rocas de forma cilíndrica o prismática, de donde se deduce la resistividad ρ por medio de la ecuación de la resistividad:

$$\rho = R \frac{A}{\ell} \quad (1)$$

Donde;

ℓ = Es la longitud de la muestra

A = El Área (expresado en m y m^2)

R = Resistencia (Ohmios)

Algo que se debe tener en cuenta es el contacto entre la muestra y los electrodos. Uno de los métodos más antiguos consiste en sujetar la muestra en un marco rígido, aprisionándola con un vástago roscado, que se aprieta todo lo posible, de modo que hagan buen contacto con la muestra hojas de papel de estaño o de aluminio colocadas en sus extremos. También puede emplearse mercurio, de la manera como se indica en la imagen 5 inspirada por Heiland¹, quien la empleo con resultados aceptables. Este tipo de contactos es muy adecuado para testigos de sondeo.

Otro procedimiento consiste en cubrir dos caras opuestas de la muestra con una capa de grafito, la cual puede obtenerse incluso frotando la superficie con un lápiz blanco. Sobre esta capa se colocan hojas de aluminio o metálico conectadas al circuito de medición. Parkhomenko², en

¹ HEILAND, C.A. Geophysical Exploration. Prentice Hall (1946)

² PARKHOMENKO, E.I. Electrical Properties of Rocks. Plenum Press. New York (1967)

su obras sobre las propiedades eléctricas de las rocas, indica que este procedimiento no puede utilizarse para medidas a temperaturas altas (más de 300° C) ya que el grafico se quemaría, y recomienda electrodos de oro o de platino depositados contra ella a prisiones del orden de 100 kg/cm², siempre que la superficie de la muestra pueda considerarse como ópticamente plana.

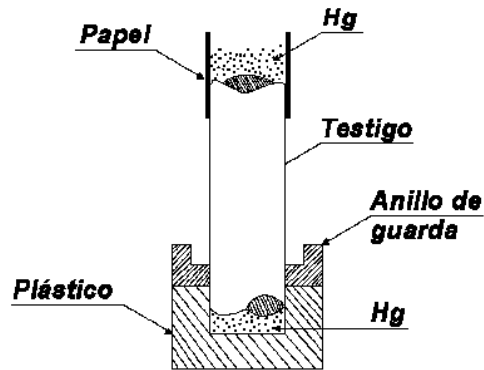


Imagen 5. Empleo de mercurio para establecer el contacto con las muestras en la medición de resistividades

Una causa de error en las mediciones es la conducción superficial en la muestra, causada por las paredes que hayan absorbido humedad. Tal circunstancia puede evitarse mediante el empleo de anillos de guarda, que rodean a uno de los electrodos, y estén separados de él, según Parkhomenko, no más de 2 mm. El anillo de guarda se conecta del modo que se puede ver en la imagen 6.

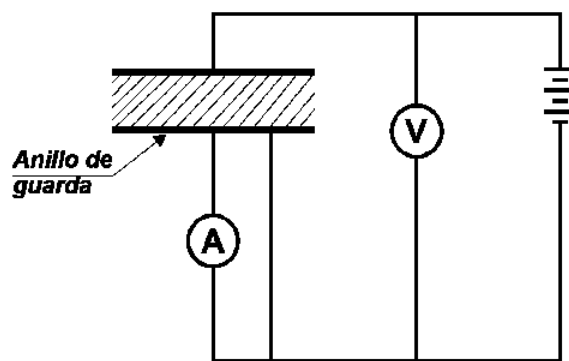


Imagen 6. Esquema de un montaje con anillo de guarda, para la medición de resistividades de muestras.

Preparada la muestra con sus contactos, basta medir la resistencia eléctrica de esta y aplicar la ecuación de la resistividad eléctrica.

La medida de dicha resistencia puede hacerse fácilmente utilizando un voltímetro y un amperímetro, como se indica en la imagen 6. En algunos casos el valor de la resistencia de la muestra es considerablemente pequeño, es necesario, en estos casos y muchas veces en general,

poseer resistencias que se puedan conectar como shunts, para que la precisión del amperímetro sea mucho mayor. En realidad el amperímetro habrá de ser, según los casos, un miliamperímetro, micro amperímetro o incluso llegara a ser un pico amperímetro.

Es difícil, y en algunos casos imposibles, obtener una aproximación útil de la resistividad del suelo a partir de mediciones de resistividad en las muestras. Esto es debido a la dificultad de obtener representativa, muestras de suelo homogéneo, y en duplicar el contenido original compactación del suelo y la humedad en la celda de ensayo.

2.1.1 Tipo y cantidad de muestras a tomar

Muestra simple: Es la que se obtiene con una sola extracción de suelo. Son usadas en trabajos de investigación y en suelos muy homogéneos. Se recomienda cuatro muestras por hectárea, de 1 kilogramo de suelo cada una.

Muestra compuesta: Se refiere a la muestra de suelo obtenida por la extracción de varias muestras simples o submuestras, reunidas en un recipiente y bien mezcladas, de donde se retiran de 0,5 a 1 kg de suelo.

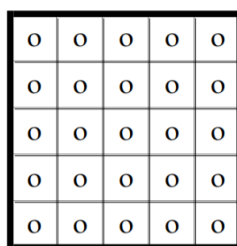
En la toma de una muestra compuesta, se debe tener en cuenta que cada submuestra sea del mismo volumen que las demás y representar la misma sección transversal del volumen de que se toma la muestra (una misma profundidad).

2.1.2 Sitios de Muestreo

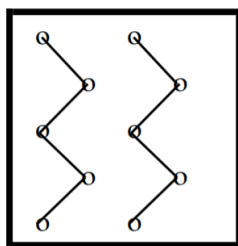
El muestreo de suelos se deberá realizar al azar y en las siguientes formas.

2.1.2.1 Sistemáticos:

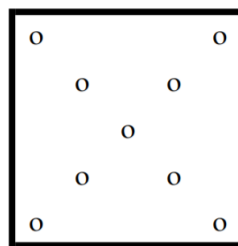
Como ilustran los siguientes esquemas:



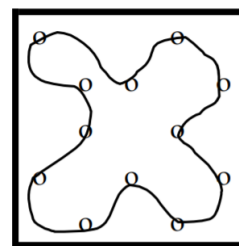
Cuadrícula



Zig - Zag



Diagonal



Sinuosa

2.1.2.2 Asistemáticos.

Cuando no se tiene un diseño especial.

2.2 Método de Wenner o 4 Puntos

Este método fue desarrollado por Frank Wenner y publicado en la Scientific Paper of the Bureau of Standars N° 258 del 11 de Octubre de 1915.

Es un caso particular del método de los cuatro electrodos, solo que aquí se disponen en línea recta y equidistante una distancia “a”, simétricamente respecto al punto en el que se desea medir la resistividad del suelo, no siendo necesario que la profundidad de los electrodos auxiliares, sobrepase los 30 cm. El aparato de medición no es necesario un equipo pesado para realizar las medidas; los resultados no son afectados por la resistencia de los electrodos auxiliares o los huecos creados para hincarlos en el terreno.

La profundidad a la cual se deben enterrar los electrodos debe ser igual o menor al 5% del espaciamiento de los electrodos. El electrodo debe tener contacto únicamente en el fondo del orificio.

El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia a través de la tierra entre dos electrodos A y B mientras que el potencial que aparece se mide entre dos electrodos M y N. Estos electrodos están enterrados en línea recta y a igual separación entre ellos. La razón V/I es conocida como la resistencia aparente. La resistividad aparente del terreno es una función de esta resistencia y de la geometría del electrodo.

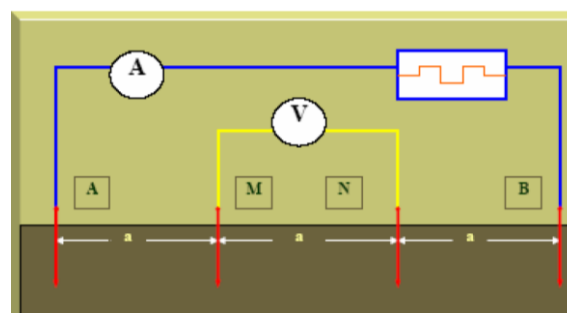


Imagen 7. Método de Wenner

Con este método la resistividad está dada por:

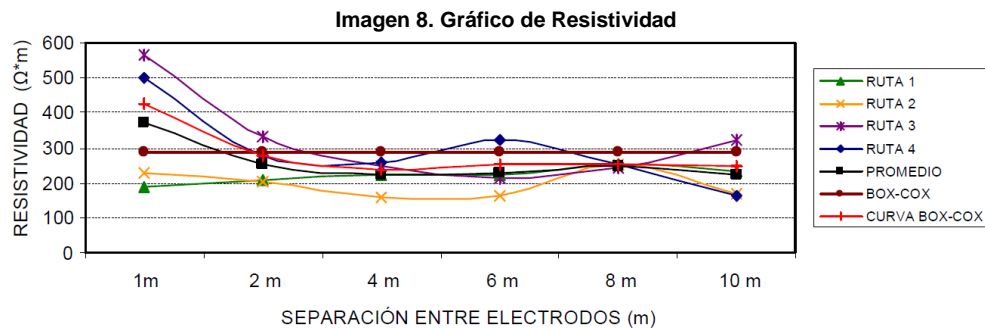
$$\rho = 2\pi * a * R \quad (2)$$

Donde;

a= Separación entre los electrodos

R= Resistencia del terreno obtenida en la medición

Para determinar el cambio de la resistividad del suelo con la profundidad, el espaciamiento entre electrodos se varía desde pocos metros hasta un espaciamiento igual o mayor que la máxima dimensión esperada del sistema de puesta a tierra. Para caracterizar la variación de la resistividad del suelo dentro de un área específica, se deben realizar varios grupos de medidas (perfiles) en diferentes direcciones.



Diferentes lecturas tomadas con varios espaciamientos alineados dan un grupo de resistividades (perfil), que cuando son graficas contra el espaciamiento, indican si hay capas diferentes de suelo y dan una idea de su respectiva profundidad y resistividad. (Ver figura 8).

2.3 Método de Schlumberger

El método de Schlumberger es una modificación del método de Wenner, ya que también emplea 4 electrodos, pero en este caso la separación entre los electrodos centrales o de potencial [a] se mantiene constante, y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores a partir de los electrodos interiores, a distancia múltiplos [na] de la separación base de los electrodos internos [a].

La profundidad de enterramiento [b] de los electrodos no será mayor que 10cm. En el caso que "L (longitud entre C1 y C2)" sea igual o menor que 10m. Para los valores de [L], mayores de 10m, la profundidad de enterramiento [b] debe ser mayor que 10cm, no sobrepasa los 20cm.

La configuración, así como la expresión de la resistividad correspondiente a este método de medición se muestra en la imagen 9.

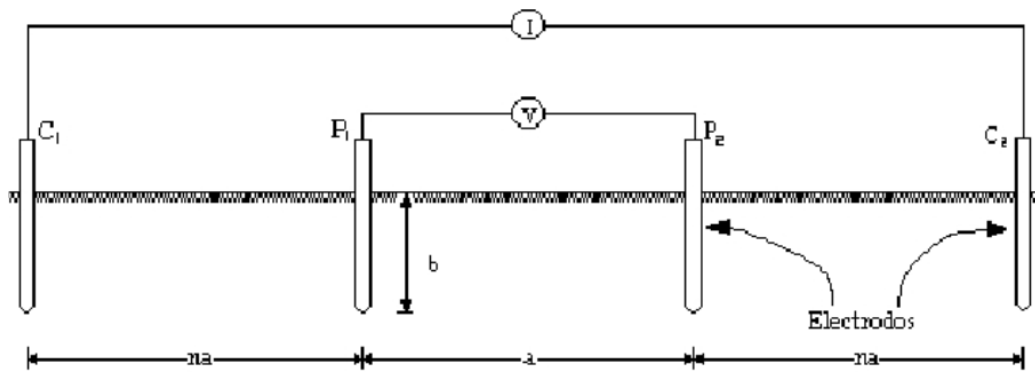


Imagen 9. Método de Schlumberger

Con este método, la resistividad está dada por:

$$\rho = 2\pi R * (n + 1) * na \quad (3)$$

El método de Schlumberger es de gran utilidad cuando se requieren conocer las resistividades de capas más profundas, sin necesidad de realizar muchas mediciones como con el método de Wenner. Se utiliza también cuando los aparatos de medición son poco inteligentes. Solamente se recomienda hacer mediciones a 90 grados para que no resulten afectadas las lecturas por estructuras subterráneas.

2.4 Método Deschlumberger - Palmer

En este arreglo al igual que en el de Wenner, los electrodos de emisión (corriente) y medición (tensión) están en situación en línea recta. La variante de este arreglo radica en que la separación entre los electrodos de tensión y entre estos y los de corriente.

En este método, los electrodos de medición deben ubicarse cerca de sus correspondientes de emisión, incrementado así la tensión leída por el equipo, lo cual es una fortaleza del método, debido a que los valores muy reducidos, propios de la aplicación de métodos como el de Wenner en separaciones grandes, disminuyen la confiabilidad del valor arrojado por el instrumento, pues en algunos casos tienden a aproximarse a su propia precisión. Así, en mediciones en las que se planea una exploración a grandes profundidades, es recomendable la utilización del método Schlumberger, ya que frecuentemente los instrumentos comerciales son inadecuados para la medición de los bajos valores que se presentan.

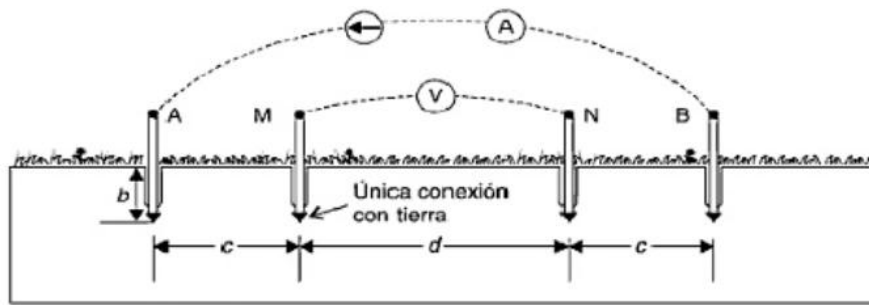


Imagen 10. Método de Schlumberger – Palmer

La fórmula con la cual se calcula:

$$\rho = \frac{\pi c(c+d)R}{d} \quad (4)$$

Considerando: $b \ll c < d$

ρ : Resistividad del suelo (Ohm – m)

R: Valor leído en el teluometro. (Ohm)

C: Separación entre el electrodo de corriente y su correspondiente de tensión, (m)

D: Separación entre los electrodos de tensión.

2.5 Método de Caída de Potencial

Este es el método más empleado para la medición de la resistencia de sistemas de tierra; requiere dos electrodos auxiliares, una fuente de voltaje, voltímetro y amperímetro. La disposición y conexión de los equipos se muestran en la imagen 11.

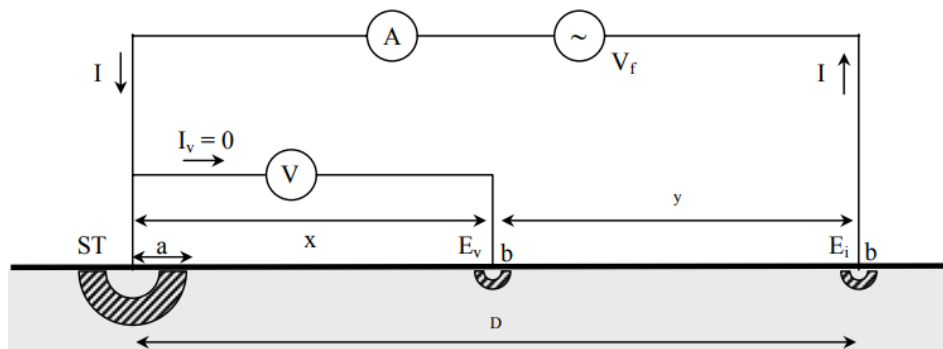


Imagen 11. Método de Caída de Potencial

Con referencia a la imagen 11:

ST: Sistema de Conexión a Tierra al cual se le va medir la resistencia

E_v Electrodo Auxiliar de Voltaje

E_i: Electrodo Auxiliar de Corriente
V: Voltímetro
A: Amperímetro
V_f: Fuente de alimentación

La resistencia de un Sistema de Tierra está representado por la relación entre voltaje medido en un punto y la corriente inyecta I. La impedancia interna del voltímetro se considera de un valor elevado de tal forma que $I_v \ll I$. Por lo tanto el efecto de I_v sobre la medición se puede considerar despreciable. El sistema de conexión a tierra es un electrodo hemisférico de radio **a**, y los electrodos auxiliares E_v, E_i tienen radio **b**. Se asume que **a** >> **b**.

Bajo estas condiciones el voltaje medido por el voltímetro será la diferencia de potencial entre ST y E_v. El voltaje respecto a una referencia remota de cada uno de estos electrodos es:

$$V_{ST} = \frac{\rho I}{2\pi a} - \frac{\rho I}{2\pi D} \quad (5)$$

$$V_{EV} = \frac{\rho I}{2\pi x} - \frac{\rho I}{2\pi y} \quad (6)$$

El voltaje medido por el voltímetro es:

$$V = V_{ST} - V_{EV} = \frac{\rho I}{2\pi} \left\{ \frac{1}{a} - \frac{1}{D} - \frac{1}{x} + \frac{1}{y} \right\} \quad (7)$$

La resistencia medida será:

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi a} - \frac{\rho}{2\pi} \left\{ \frac{1}{D} - \frac{1}{x} + \frac{1}{y} \right\} \quad (8)$$

Se conoce que el valor verdadero de la resistencia del sistema de tierra está determinado por:

$$R_v = \frac{\rho}{2\pi a} \quad (9)$$

El factor que se sustrae del valor verdadero en la resistencia medida R_m en (8), es el error cometido en la medición. De esta forma el valor medido se puede expresar como la suma algebraica de dos factores: el valor verdadero R_v , y el error cometido en la medición R_e debido a la influencia del electrodo auxiliar de corriente E_i.

$$R_m = R_v - R_e \quad (10)$$

Si por algún medio se consigue anular R_e , el valor medido será igual al valor verdadero. Un primer análisis de la expresión (8) permite concluir

que en la medida que las distancias (D, x, y) se incrementan, el valor medido se aproxima más al valor verdadero.

2.5.1 Regla del 61.8%

El valor verdadero de la resistencia a tierra también puede obtenerse a partir de la resistencia medida si se encuentran las relaciones entre los valores x, y, D que anulen el error cometido, es decir:

$$R_e = \frac{\rho}{2\pi} \left\{ \frac{1}{D} + \frac{1}{x} - \frac{1}{y} \right\} = 0 \quad (11)$$

De la formula (7) se obtiene que para anular R_e debe cumplirse:

$$x \cdot y + D \cdot y - D \cdot x = 0 \quad (12)$$

Si los electrodos E_v y E_i están alineados se cumple que:

$$D = x + y \quad (13)$$

Despejando “y” de la formula (13) y sustituyendo en (12) se obtiene la siguiente ecuación:

$$x^2 + D \cdot x - D^2 = 0 \quad (14)$$

Ecuación que tiene como solución $x = 0,618D$ y $x = -1.618D$. Esto significa que ubicando el electrodo auxiliar E_v a una distancia del 61,8% de la distancia D, la resistencia medida es igual al valor verdadero de la resistencia del sistema de tierra. La solución negativa de x no tiene interpretación dentro del contexto de ubicación de los electrodos: $D = x + y$

2.6 Método de Medición de resistencia de una varilla (Variación con la Profundidad)

También conocido en la norma ANSI/ IEEE Std 81-1983 como el Método de la Variación de Profundidad (Variation of depth method), consiste en medir la resistencia de puesta a tierra de un electrodo tipo varilla y, basados en la ecuación de resistencia a tierra de un electrodo vertical en un suelo homogéneo y los datos geométricos de la varilla, derivar la resistividad del suelo. Se asume que el terreno es homogéneo:

$$\rho = \frac{2\pi LR}{\ln\left(\frac{4L}{a}\right) - 1} \quad (15)$$

Donde;

ρ : Resistividad del terreno

L: Longitud del electrodo

a: Radio del Electrodo

R: Valor de resistencia leído por el equipo

El procedimiento comúnmente aplicado es el de disponer una varilla metálica con marcaciones cada 20 o 30 cm, y cuya longitud debe ser la suficiente como para obtener la mayor información posible de la variaciones de la resistencia leída a medida que penetra la varilla en la tierra (lo que origino el nombre de Método de la Variación de Profundidad), es decir por cada marca se lee un valor de resistencia y con la formula (15) se calcula la resistividad.

Este método solo se debe aplicar cuando no se disponga del espacio suficiente para utilizar los métodos de Wenner o de Schlumberger-Palmer, pues la prospección es mucho menor, o en el caso de solo poder disponer de un teluometro de tres electrodos.

Fase 3: Modelo según Normativa de la IEEE - 81-1983

3.1 Modelo de suelo homogéneo

El modelo del suelo como factor decisivo para el dimensionamiento y estudio del comportamiento de un sistema de puestas a Tierra, a través del cual van a circular las corrientes de falla y/o descarga de una instalación eléctrica, motivo inicial de este estudio para determinar el modelo para ser utilizado. En la mayoría de los casos, los terrenos son de naturaleza no homogénea aun para pequeñas profundidades ($\pm 10m$), ya sea por formaciones naturales o artificiales; esta última muy comunes por los rellenos de materiales lo que añade complejidad en la interpretación de las medidas de campo de resistividad del terreno.

La prospección del suelo para el diseño de un Sistema de Puesta Tierra debe ser al menos de 40 metros de profundidad y considerarlo como homogéneo introduce errores en el modelamiento del suelo y a su vez en el diseño de los SPT (IEEE STD 81-1983).

3.1.1 Clasificación de los métodos de modelación de los suelos homogéneos.

- I. Valor promedio de las resistividades medidas
- II. Promedio de la medición mínima y la medición máxima de resistividades aparentes.
- III. Método estadístico BOX-COX.

Se debe tener en cuenta que estos métodos pueden ser aplicados cuando la diferencia de variación de las mediciones es moderada.

3.1.1.1 Valor Promedio de las Resistividades Medidas: Es uno de los modelos más rápidos de elaborar, pero menos preciso, este puede ser utilizado como una primera aproximación, el cual puede obtenerse mediante el promedio aritmético de las mediciones como se muestra en la ecuación 16:

$$\rho_{a(av1)} = \frac{\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}}{n} [\Omega * m] \quad (16)$$

En donde:

$\rho_{a(1)} + \rho_{a(2)} + \rho_{a(3)} + \dots + \rho_{a(n)}$: Mediciones de resistividad aparente realizadas.

n : Numero de mediciones realizadas.

3.1.1.2 Promedio de la medición mínima y la medición máxima de resistividades aparentes: Se aplica la ecuación (17):

$$\rho_{2(av2)} = \frac{\rho_{a(max)} + \rho_{a(min)}}{2} [\Omega \cdot m] \quad (17)$$

En dónde;

$\rho_{a(max)}$: Valor máximo de la resistividad aparente medida

$\rho_{a(min)}$: Valor mínimo de la resistividad aparente medida

El modelo de suelo homogéneo determinado utilizando la ecuación 17, del máximo y mínimo de las resistividades, debe emplearse para diseñar una malla de tierra con varillas, las cuales deben, por lo menos, alcanzar la profundidad a la cual corresponde la resistividad promedio.

3.1.1.3 Método estadístico de Box Cox: Este método busca un valor con probabilidad de 70% de ser el valor real y se emplea aplicando los siguientes pasos:

- Elaborar una tabla, en una columna se tabulan los datos de resistividad aparente medida ρ_i .
- En otra columna se colocan los logaritmos naturales de las resistividades aparentes $Ln(\rho_i)$.
- Se encuentra el promedio de los valores obtenidos en el paso 2 que serán $Ln(\rho)_{PROM}$.
- En otra columna se coloca el resultado de la siguiente operación $(Ln(\rho_i) - Ln(\rho)_{PROM})^2$ para cada medición.
- Se calcula la desviación estándar como:

$$S = \sqrt{\frac{(Ln(\rho_1) - Ln(\rho)_{PROM})^2 + (Ln(\rho_2) - Ln(\rho)_{PROM})^2 + \dots + (Ln(\rho_i) - Ln(\rho)_{PROM})^2}{n}} \quad (18)$$

- De la distribución normal se toma Z para 70%, del cual se obtiene como resultado 0.524411.
- Se utiliza la ecuación 19 para encontrar la resistividad con 70% de probabilidad de ser la real:

$$\rho = e^{(S+Z) + Ln(\rho)_{PROM}} [\Omega \cdot m] \quad (19)$$

3.1.2 Clasificación de los métodos de modelación de suelo no homogéneo

- I. Método gráfico de Sunde
- II. Método del gradiente

Los métodos de modelado de suelo no homogéneo es el más complicado de aplicar ya que se buscan las resistividades de la capa superficial y su espesor y la capa más profunda asumiendo espesor infinito (Ver imagen 12)

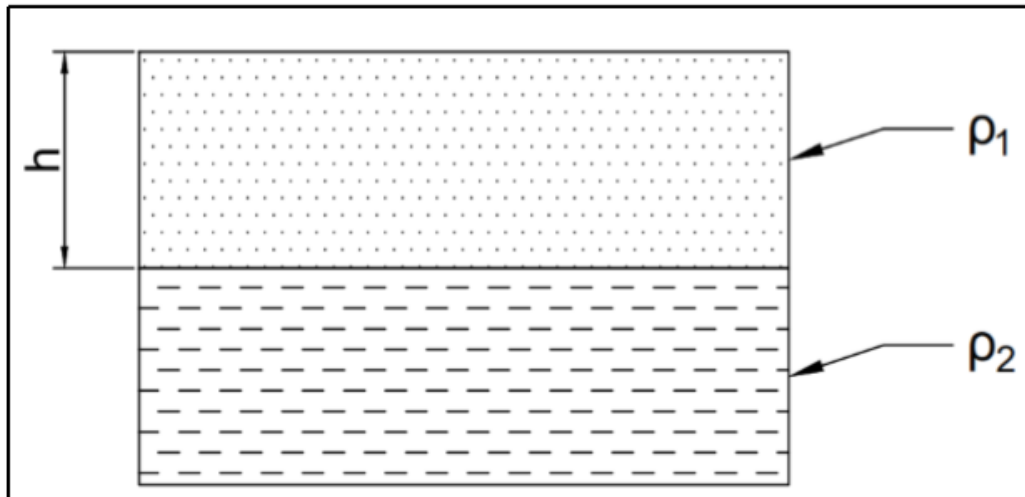


Imagen 12. Resultado esperado del modelado de 2 capas

3.1.2.1 Método gráfico de Sunde: (IEEE Std 80, 2000): El cual involucra un coeficiente de reflexión, calculado por medio de la ecuación 22, que es un factor que representa el cambio abrupto de la resistividad aparente en los límites de cada capa de suelo.

$$K = \frac{P_2 - P_1}{P_1 - P_2} \quad (20)$$

En donde:

P_1 : Resistividad de la capa superficial

P_2 : Resistividad de la capa interna

A continuación, se enlistan los pasos a seguir para determinarla profundidad de la capa superficial h en el método gráfico de Sunde. Las resistividades de ambas capas tanto la superficial como las más profundas son determinadas por simple inspección mediante la gráfica resistividad aparente vs espaciamentos de prueba. Las mediciones de resistividad deben ser con el método de cuatro puntos arreglo Wenner.

1. Dibujar la gráfica de resistividad aparente vs espaciamiento de electrodos de prueba con los obtenidos de las mediciones.

2. Estimar, de la gráfica del paso 1, la resistividad de la capa superficial y la resistividad de la capa más profunda P_1 y P_2 respectivamente.
3. Determinar $\frac{P_2}{P_1}$ y seleccionar la curva de la gráfica de Sunde (Imagen 13), si no existe una curva exacta, se debe interpolar y dibujar una nueva curva más cercana.
4. Seleccionar el valor de Y de $\frac{P_a}{P_1}$ dentro de la región de la pendiente de la curva $\frac{P_2}{P_1}$ encontrada en el paso 3.
5. Leer el correspondiente valor de $\frac{a}{h}$ en el eje x
6. Calcular P_a , despejando de $\frac{P_a}{P_1}$ de paso 4.

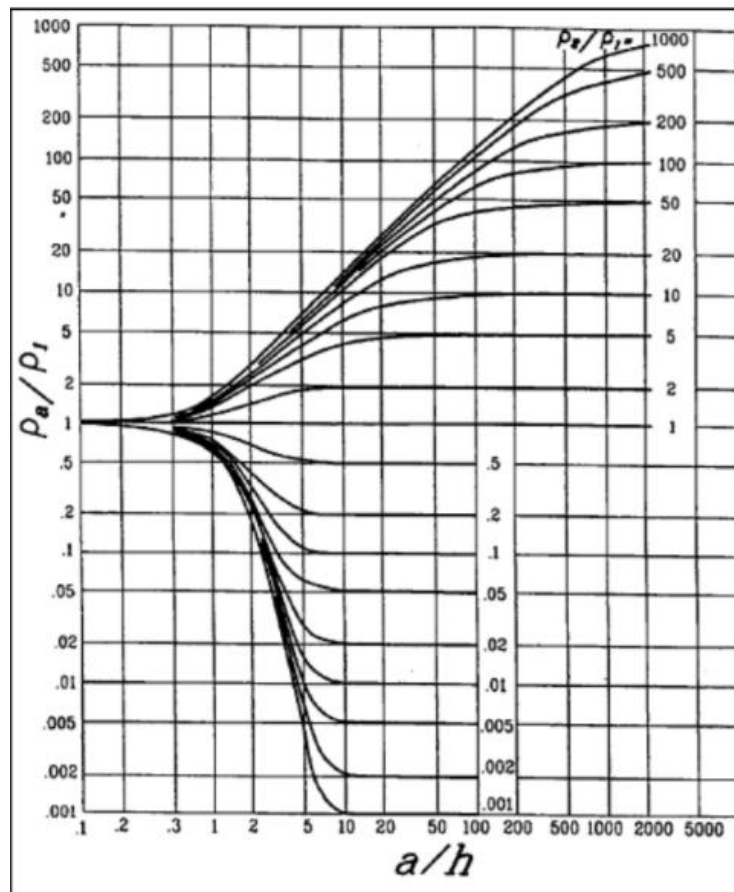


Imagen 13. Grafica de Sunde

7. Leer el espaciamento de electrodo de prueba a de la gráfica del paso 1, con la resistividad aparente P_a encontrada en el paso 6.
8. Calcular la profundidad de la superficie h con resistividad P_1 despejando de la ecuación $\frac{a}{h}$ del paso 5, conociendo a obtenido en el paso 7.

3.1.2.2 Método del gradiente descendente: Este método puede ser utilizado cuando las mediciones han sido obtenidas mediante el arreglo Wenner (IEEE Std 81, 2012) primeramente, se tiene la ecuación 21 que se utiliza para obtener la resistividad aparente

$$p(a) = p_1 \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{k^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a} \right)^2}} - \frac{k^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a} \right)^2}} \right) \right] \quad (21)$$

$$k = \frac{p_2 - p_1}{p_2 + p_1} \quad (22)$$

A partir de esta ecuación se implementa un algoritmo denominado método del gradiente descendente, que utiliza la ecuación 29-31 para minimizar una función error dada por la ecuación 23.

$$\Psi(P_1, P_2, h) = \sum_{m=1}^N \left[\frac{P_m^0 - P_m}{P_m^0} \right]^2 \quad (23)$$

Dónde:

N: Número total de valores de resistividad medidos con un espaciamiento entre electrodos a como parámetro

P_m^0 Resistividad medida para un espaciamiento a entre electrodos

P_m Resistividad calculada con la ecuación 21 para un espaciamiento a entre electrodos

Para minimizar el error se reajusta los valores para P_1, P_2 y h sumando un valor dependiente del error que se tiene en la iteración actual. Dichos valores se definen en las ecuaciones 24-26.

$$\Delta P_1 = -0.005 |p_1| \sin \left(\frac{\partial \psi}{\partial p_1} \right) \quad (24)$$

$$\Delta P_2 = -0.005 |p_2| \sin \left(\frac{\partial \psi}{\partial p_2} \right) \quad (25)$$

$$\Delta h = -0.005 |h| \sin \left(\frac{\partial \psi}{\partial p_h} \right) \quad (26)$$

El error viene dado por la ecuación 27. Un valor de error común para este método es de 0.0001.

$$|\Delta \psi| > E \quad (27)$$

$$\Delta \psi = \frac{\partial \psi}{\partial p_1} \Delta p_1 + \frac{\partial \psi}{\partial p_2} \Delta p_2 + \frac{\partial \psi}{\partial p_h} \Delta p_h \quad (28)$$

Donde:

$$\frac{\partial \psi}{\partial p_1} = -2 \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\frac{p^0 a_i - p(a_i)}{[p^0(a_i)]^2} \right] \left[1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\left(1 - \frac{n(1-k^2)}{2k} \right) \left(\frac{k^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a_i} \right)^2}} - \frac{k^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a_i} \right)^2}} \right) \right] \right] \right\} \quad (29)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial p_2} = -2 \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\frac{p^0 a_i - p(a_i)}{[p^0(a_i)]^2} \right] \left[\sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2n}{k} (1 - k^2) \left(\frac{k^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a_i} \right)^2}} - \frac{k^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a_i} \right)^2}} \right) \right] \right] \right\} \quad (30)$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial h} = -2 \sum_{i=1}^n \left\{ \left[\frac{p^0 a_i - p(a_i)}{[p^0(a_i)]^2} \right] \left[\frac{16p_1 h}{a^2} \sum_{n=1}^{\infty} \left[n^2 \left(\frac{k^n}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a_i} \right)^2} \right)^3} - \frac{k^n}{\left(\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a_i} \right)^2} \right)^3} \right) \right] \right] \right\} \quad (31)$$

En el diseño de sistema de puesta a tierra el modelo de dos capas es generalmente el adecuado para utilizar (Ibsain & Ammar, 2014).

3.2 Instrumento de Medición

3.2.1 El Kyoritsu

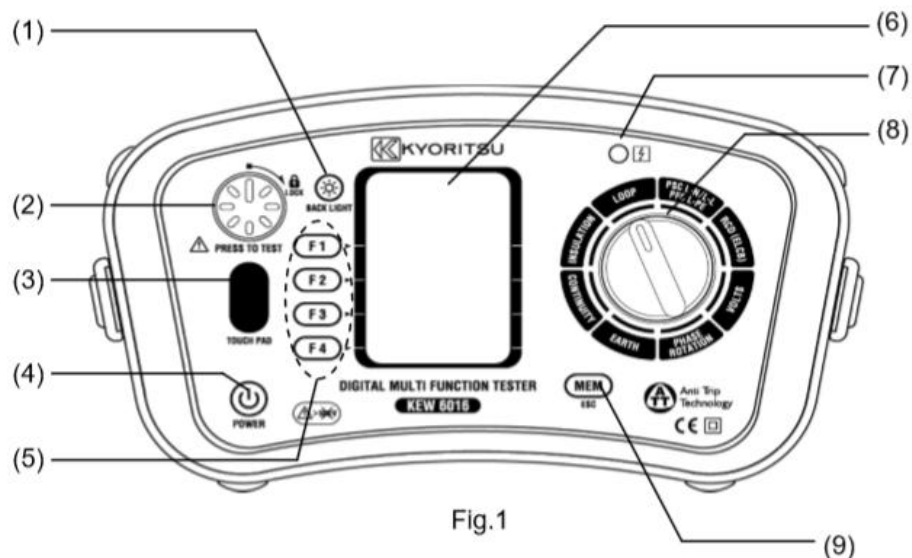
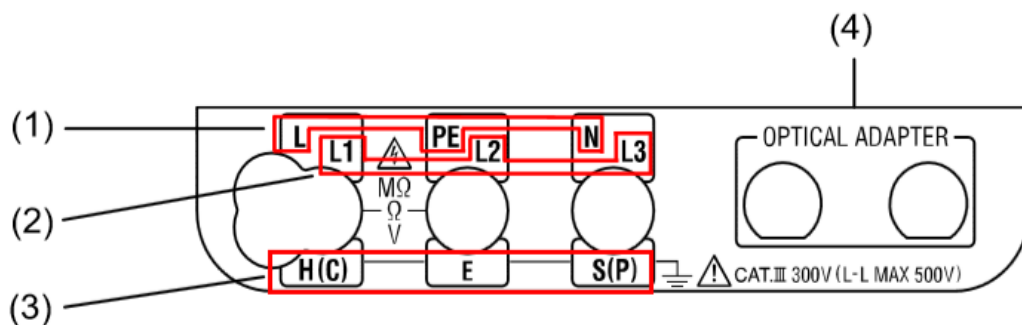


Fig.1

| Nombre | Operación |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| 1 Botón de retroiluminación | Enciende/apaga la luz del display (LCD) |
| 2 Botón de medición | Inicia la medición (pulse y gire para mantenerlo pulsado). |
| 3 sensor | Comprueba el potencial eléctrico en el terminal PE |
| 4 Encendido/apagado | Interruptor de encendido y apagado |
| 5 Botones defunción | Activa diversas funciones (F1-F4) |
| 6 Display (LCD) | Matriz de puntos LCD 160(W)X240(H) |
| 7 LED de resistencia | Alerta cuando se está utilizando una tensión de prueba en la salida |
| 8 Selector de funciones | Selecciona la función de medición |
| 9 Botón MEM (ESC) | Activa la función de memoria , o botón ESC |

Terminal de entrada



| | Función | Terminal |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| (1) | Nombre de terminales para : AISLAMIENTO, CONTINUIDAD DE BUCLE, PFC/PSC, DCR, TENSION | L : Línea |
| | | PE : Tierra |
| | | N : Neutro (para BUCLE,PSC/PFC, DCR) |
| | | |
| (2) | Nombre de terminales para; SECUENCIA DE FASES | L1 : Línea 1 |
| | | L2 : Línea 2 |
| | | L3 : Línea 3 |
| (3) | Nombre de terminales para: TIERRA | H(C) : Terminal para pica auxiliar de tierra (intensidad) |
| | | E : Terminal para tierra a comprobar |
| | | S(P) : Terminal para pica auxiliar de tierra (tensión) |
| (4) | Adaptador óptico | Puerto de comunicación para el USB Modelo 8212 |

Principio de medición de Tierra según Kyoritsu:

La función de tierra permite realizar mediciones sobre líneas de distribución, sistemas de cableado domésticos, dispositivos eléctricos, etc.

Este instrumento mide la resistencia de tierra con el con el método de caída de potencial .Este método consiste en obtener la resistencia de tierra Rx aplicando una intensidad CA constante entre los objetos de medición E (electrodo de tierra) y H(C) (electrodo de intensidad), calculando de esta forma la diferencia de potencial V entre E y S(P) (electrodo de potencial).

$$R_x = V/I$$

Advertencia:

Al realizar una medición de resistencia de tierra, el instrumento produce una tensión máxima de alrededor de 50v entre los terminales E-H((C)).Tome precauciones para no sufrir una posible electrocución

Precaución:

No aplique ninguna tensión entre los terminales de medida al realizar una medición de resistencia de tierra.

3.2.2 El fluke 1623



- General

| | |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Pantalla: Cristal líquido de 1.999 dígitos | Pantalla con símbolos especiales y altura de dígitos de 25 mm |
| Interfaz de Usuario | Medición instantánea mediante un solo botón (TURN/STAR (ENCENDER/ARRANCAR)). Los únicos elementos operables son el selector giratorio y el botón START |
| Alta resistencia al agua y al polvo | El instrumento está diseñado para soportar condiciones ambientales severas (Cubierta protectora de goma, IP56) |
| Memoria | Memoria interna con capacidad de almacenamiento de hasta 1,500 registros, a la que se puede acceder a través de un puerto USB |

- Medida de la resistencia de puesta a tierra R_A de 3 polos (IEC 1557-5)

| Posición del selector | Resolución | Rango de medición | Precisión | Error de operación |
|-----------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| R_A de 3 polos | 0,001 Ω a 10 Ω | 0,02 Ω a 19,99 k Ω | \pm (2 % de lectura + 3 d) | \pm (5 % de lectura + 3 d) |

- Principio de medición: Medición de corriente y voltaje

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Medición de voltaje | $V_m = 48 \text{ V CA}$ |
| Corriente en cortocircuito | $> 50 \text{ mA}$ |
| Medida de frecuencia | 128 Hz |
| Resistencia de la sonda (R_S) | 100 k Ω máx. |
| Resistencia del electrodo de puesta a tierra auxiliar (R_H) | 100 k Ω máx. |
| Error adicional de R_H y R_S | $R_H[\text{k}\Omega] - R_S[\text{k}\Omega] / R_A[\Omega] - 0,2 \%$ |
| Monitoreo de R_S y R_H con indicador de error | |
| Selección automática de rangos | |
| No se realiza la medición si la corriente que pasa a través de la pinza amperimétrica es demasiado baja | |

3.2.3 GPS

El popular GPS de mano con pantalla mejorada y mapas preinstalados

- Pantalla con colores nítidos de 2,2 pulgadas
 - Mapa TopoActive preinstalado de Europa Occidental de Garmin con relieve sombreado
 - Receptor GPS de alta sensibilidad compatible con HotFix® y GLONASS
 - 4 GB de memoria interna. Se puede ampliar con una tarjeta microSD™ (no incluida).
 - Mapa base mundial con relieve sombreado
- eTrex 20x es nuestra versión mejorada del popular eTrex 20, con una resolución de pantalla mejorada y memoria interna ampliada con capacidad para un mayor número de mapas. El mapa TopoActive preinstalado de Garmin es compatible con una gran variedad de actividades al aire libre, como senderismo, geocaching, ciclismo, montañismo y pesca, ofreciendo experiencias mejoradas. eTrex 20x dispone de funciones mejoradas con respecto al modelo eTrex 20, a la vez que mantiene su facilidad de uso, asequibilidad y excelente durabilidad.



Visualiza el camino

eTrex 20x dispone de una pantalla mejorada de 2,2 pulgadas y 65.000 colores que puede leerse a la luz del sol. Duradera y resistente al agua, la unidad eTrex 20x está diseñada para soportar las inclemencias meteorológicas. Presenta una interfaz mejorada, pero conserva su resistencia para enfrentarse al polvo, la suciedad, la humedad o el agua.

3.3 Estudios de Mediciones del Suelo con sus cálculos.

3.3.1 Municipio de Managua

DATOS DE SITIO

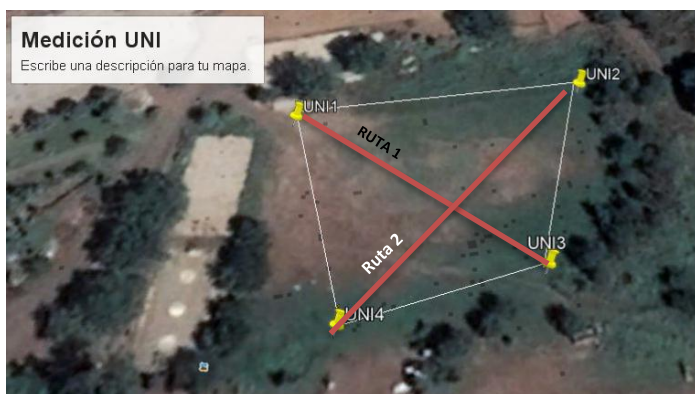
Fecha de Medición: 25/oct/2017
Sitio: UNI
Ciudad: Managua
Proyecto: Medición del Suelo
Método de Medición: Wenner, con Box Cox

CONDICIONES DEL SUELO

Color del Suelo: Café
Tipo de Terreno: Ultimo día de lluvia
Temperatura: No definido
PH:

DATOS DEL MONTAJE EN EL TERRENO

Área Máxima de Medición:
Numero de Mediciones: 5
Profundidad de los Electrodo: 0.20 mts
Observaciones:



UBICACIÓN DE LOS PUNTOS

| | Norte (x) | Sur (y) |
|----|-----------|---------|
| P1 | 0579660 | 1341246 |
| P2 | 0579578 | 1341248 |
| P3 | 0579639 | 1341188 |
| P4 | 0579583 | 1341180 |

• Datos de Medición



En el departamento de Managua se hicieron dos tipos de mediciones, utilizando diferentes equipos de medición: El de tres picas (Kyoritsu) y el de 4 Picas utilizando el Método de Wenner (Fluke). En la siguiente tabla se muestra los datos obtenidos:

| N. Medición | Mts de cada pica | Kyoritsu (Ω) | Fluke | |
|-------------|------------------|-----------------------|--------------------|---------------------|
| | | | Ruta1 (Ω) | Ruta 2 (Ω) |
| 1 | 19 | 251 | 6.93 | 8.15 |
| 2 | 2 | 263 | 5.36 | 6.99 |
| 3 | 3 | 268 | 4.54 | 3.82 |
| 4 | 4 | 258 | 4.10 | 3.19 |
| 5 | 5 | 259 | 3.54 | 2.81 |

Tabla 4

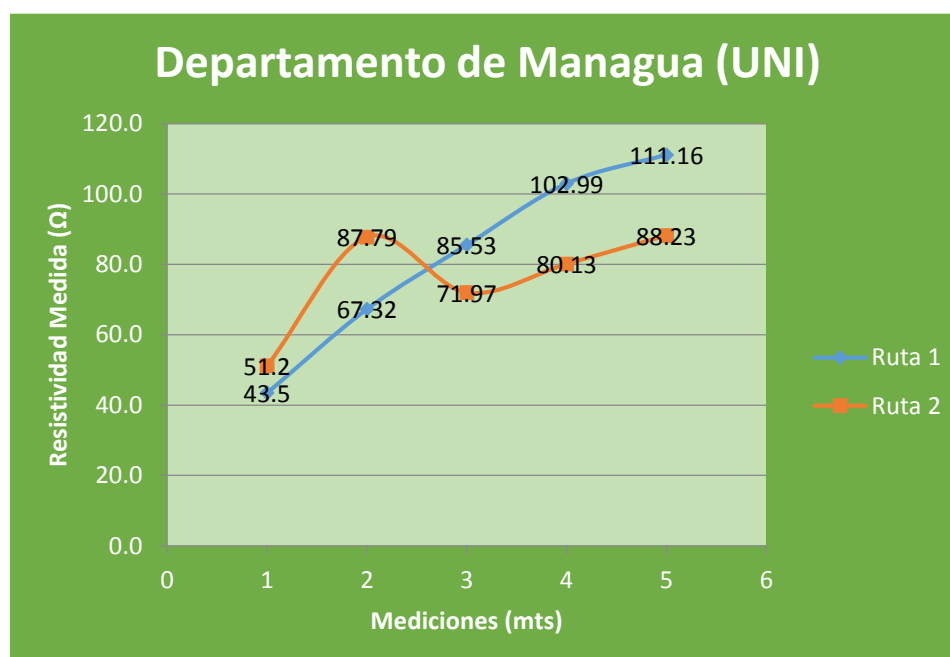
Obtenido dichas mediciones, se harán el cálculo de cada uno:

- **Método de Wenner (Fluke):**

| N. de Medición | Espaciamiento en Varillas (mts) | Cálculos de la Resistividad ($\rho = \frac{2\pi a R_m}{\ln 4}$) | |
|----------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| | | Ruta 1 (Ωm) | Ruta 2 (Ωm) |
| 1 | 1 | 43.5 | 51.2 |
| 2 | 2 | 67.32 | 87.79 |
| 3 | 3 | 85.53 | 71.97 |
| 4 | 4 | 102.99 | 80.13 |
| 5 | 5 | 111.16 | 88.23 |
| Total: | | 410.52 | 379.31 |

Tabla 5

En la gráfica 1, se observa las curvas de cada Ruta:



Gráfica 1

Analizando con el método estadístico de BOX COX, primero resolveremos el logaritmo natural de cada medición, para poder obtener una probabilidad del 70%.

| N. de Medición | Espaciamiento de la Varilla | $X_i = Lnp$ | | $(X_i - X_{medio})^2$ | |
|----------------|-----------------------------|--------------|--------------|-----------------------|-------------|
| | | Ruta 1 | Ruta 2 | Ruta 1 | Ruta 2 |
| 1 | 1 | 3.77 | 3.94 | 0.34 | 0.14 |
| 2 | 2 | 4.21 | 4.47 | 0.02 | 0.03 |
| 3 | 3 | 4.45 | 4.28 | 0.01 | 0.00 |
| 4 | 4 | 4.63 | 4.38 | 0.08 | 0.01 |
| 5 | 5 | 4.71 | 4.48 | 0.13 | 0.03 |
| | PROMEDIO | 4.36 | 4.31 | 0.11 | 0.04 |
| | SUMA | 21.78 | 21.55 | 0.57 | 0.20 |

Tabla 6

- Se calcula la desviación estándar:

$$S_{Ruta\ 1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - X_{media})^2}{\eta}} = \sqrt{\frac{0.57}{5}} = 0.33863$$

$$S_{Ruta\ 2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - X_{media})^2}{\eta}} = \sqrt{\frac{0.20}{5}} = 0.20151$$

Donde;

η = número de muestra

La distribución normal se toma Z para 70%, que da 0.524411 (Mirar Anexo, Tabla)

- Hallando la Resistividad:

$$\begin{aligned}\rho_{Ruta\ 1} &= Anti\ Ln(S \times Z + X) = Anti\ Ln(0.33863 \times 0.524411 + 4.36) \\ &= 93.04\Omega m\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\rho_{Ruta\ 2} &= Anti\ Ln(S \times Z + X) = Anti\ Ln(0.20151 \times 0.524411 + 4.31) \\ &= 82.74\Omega m\end{aligned}$$

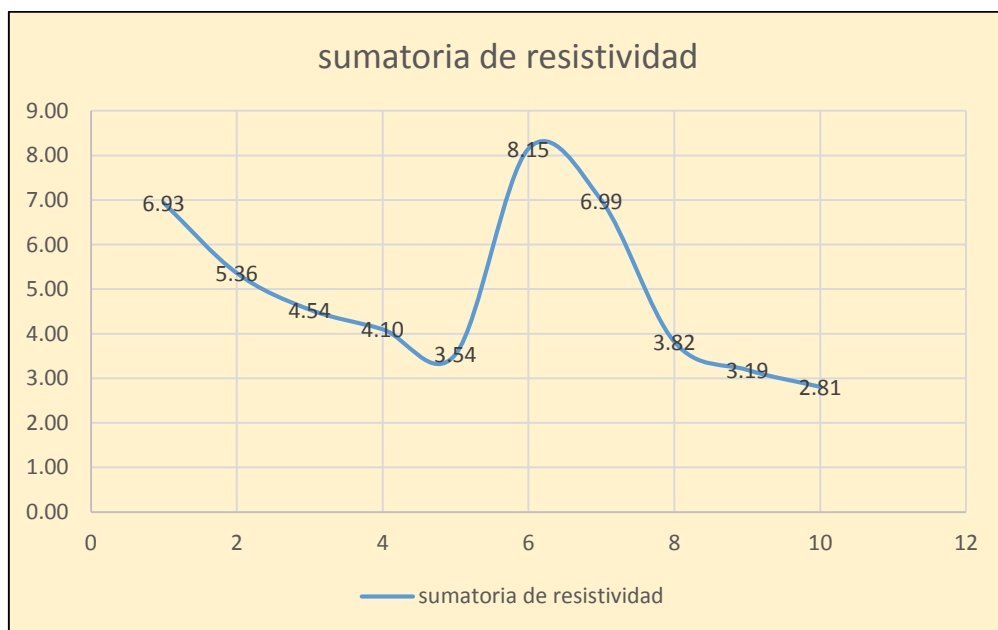
En la tabla 4 se observa la diferencia que hay entre medir la resistencia de la tierra con 3 picas y de 4 picas. Se muestra que el método de wenner lo dividimos en dos rutas. Ahora lo pondremos en una sola ruta, o sea uniremos la ruta 1 y ruta 2, como se muestra en la siguiente tabla 7.

VALOR TOTAL TERRENO DE LA UNI

| Número de medición | Espaciamento en varillas a(m) | Resistencia medida R (W) | Observación | r= 2paR | $X_i = \ln r$ | $(X_i - X_{\text{medio}})^2$ |
|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------|---------|---------------|------------------------------|
| 1 | 1 | 6.93 | | 43.5 | 3.77 | 0.31 |
| 2 | 2 | 5.36 | | 67.32 | 4.21 | 0.02 |
| 3 | 3 | 4.54 | | 85.53 | 4.45 | 0.01 |
| 4 | 4 | 4.10 | | 102.99 | 4.63 | 0.09 |
| 5 | 5 | 3.54 | | 111.16 | 4.71 | 0.14 |
| 6 | 1 | 8.15 | | 51.18 | 3.94 | 0.16 |
| 7 | 2 | 6.99 | | 87.79 | 4.47 | 0.02 |
| 8 | 3 | 3.82 | | 71.97 | 4.28 | 0.00 |
| 9 | 4 | 3.19 | | 80.13 | 4.38 | 0.00 |
| 10 | 5 | 2.81 | | 88.23 | 4.48 | 0.02 |
| Resistividad Promedio | | 4.94 | Promedio | | 4.33 | 0.08 |
| Cantidad de muestras | | | | | 10 | |
| Suma | | | | 789.84 | 43.33 | 0.78 |
| Desv. Estandar | | | | | 0.27956 | |
| Valor de Z para distribución estandar | | | | | 0.524411 | |
| Resistividad al 70% r = | | | | | 88.18 | W-m |

Tabla 7

En la gráfica 1 se muestra la resistividad de las dos rutas. En la gráfica 2 se observa la resistencia total del terreno.



Grafica 2

3.3.2 Municipio de Masaya

DATOS DE SITIO

Fecha de Medición: 25/oct/2017
 Sitio: Campo de Futbol
 Ciudad: Masaya
 Proyecto: Medición del Suelo
 Método de Medición: Wenner, con Box Cox

CONDICIONES DEL SUELO

Color del Suelo: Café
 Tipo de Terreno: Ultimo día de lluvia
 Temperatura: No definido
 PH:

DATOS DEL MONTAJE EN EL TERRENO

Área Máxima de Medición:
 Numero de Mediciones: 5
 Profundidad de los Electrodo: 0.20 mts
 Observaciones:



UBICACIÓN DE LOS PUNTOS

| | Norte (x) | Sur (y) |
|----|-----------|----------|
| P1 | 0600243 | 13233680 |
| P2 | 0600199 | 1323650 |
| P3 | 0600173 | 1323693 |
| P4 | 0600224 | 1323724 |

• Datos de Medición

En el departamento de Masaya se utilizó la medición de 4 picas, utilizando el Método de Wenner (Fluke). En la siguiente tabla se muestra los datos obtenidos:

| N. Medición | Mts de cada pica | Fluke | |
|-------------|------------------|--------------------|---------------------|
| | | Ruta1 (Ω) | Ruta 2 (Ω) |
| 1 | 1 | 12.13 | 8.78 |
| 2 | 2 | 5.03 | 4.04 |
| 3 | 3 | 2.13 | 3.12 |
| 4 | 4 | 2.82 | 2.46 |
| 5 | 5 | 2.36 | 2.16 |

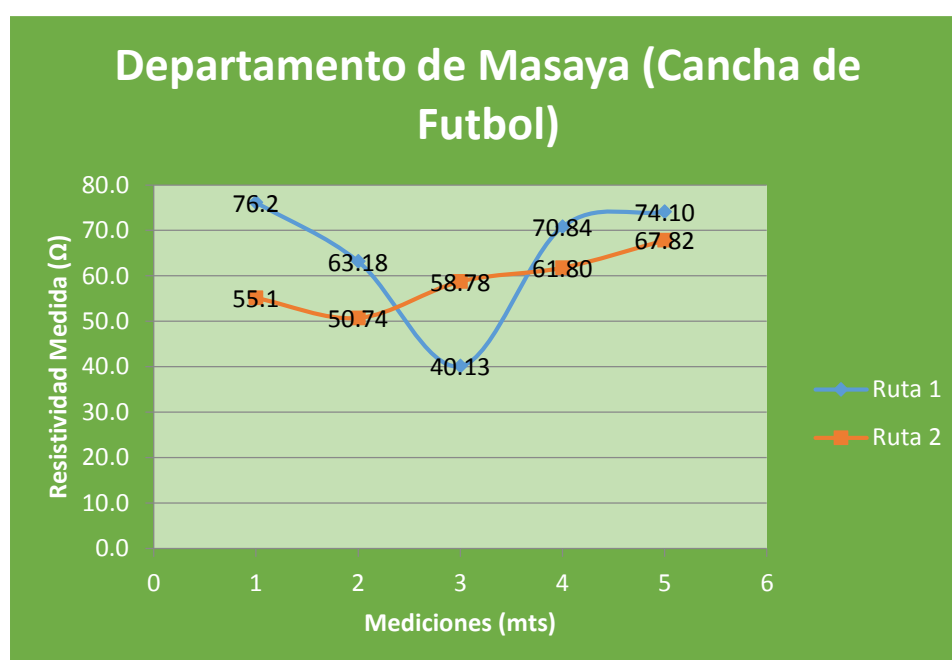
Tabla 8

○ **Método de Wenner (Fluke)³:**

| N. de Medición | Espaciamiento en Varillas (mts) | Cálculos de la Resistividad ($\rho = 2\pi a R_m$) | |
|----------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------|
| | | Ruta 1 (Ωm) | Ruta 2 (Ωm) |
| 1 | 1 | 76.2 | 55.1 |
| 2 | 2 | 63.18 | 50.74 |
| 3 | 3 | 40.13 | 58.78 |
| 4 | 4 | 70.84 | 61.80 |
| 5 | 5 | 74.10 | 67.82 |
| Total: | | 324.42 | 294.28 |

Tabla 9

En la gráfica 3, se observa las curvas de cada Ruta:



Gráfica 3

Analizando con el método estadístico de BOX COX, primero resolveremos el logaritmo natural de cada medición, para poder obtener una probabilidad del 70% en la campana de Gauss.

³ Mirar Anexo, Según Normativa tiene que ser el modelo

Tabla 10

| N. de Medición | Espaciamiento de la Varilla | $X_i = \ln \rho$ | | $(X_i - X_{medio})^2$ | |
|----------------|-----------------------------|------------------|--------|-----------------------|--------|
| | | Ruta 1 | Ruta 2 | Ruta 1 | Ruta 2 |
| 1 | 1 | 4.33 | 4.01 | 0.03 | 0.00 |
| 2 | 2 | 4.15 | 3.93 | 0.00 | 0.02 |
| 3 | 3 | 3.69 | 4.07 | 0.21 | 0.00 |
| 4 | 4 | 4.26 | 4.12 | 0.01 | 0.00 |
| 5 | 5 | 4.31 | 4.22 | 0.02 | 0.02 |
| | PROMEDIO | 4.15 | 4.07 | 0.06 | 0.01 |
| | SUMA | 20.74 | 20.35 | 0.28 | 0.05 |

- Se calcula la desviación estándar:

$$S_{Ruta\ 1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{media})^2}{\eta}} = \sqrt{\frac{0.28}{5}} = 0.23644$$

$$S_{Ruta\ 2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{media})^2}{\eta}} = \sqrt{\frac{0.05}{5}} = 0.09862$$

Donde;

η = número de muestra

La distribución normal se toma Z para 70%, que da 0.524411 (Mirar Anexo, Tabla)

- Hallando la Resistividad:

$$\rho_{Ruta\ 1} = \text{Anti Ln}(S \times Z + X) = \text{Anti Ln}(0.23644 \times 0.524411 + 4.15) = 71.62\Omega m$$

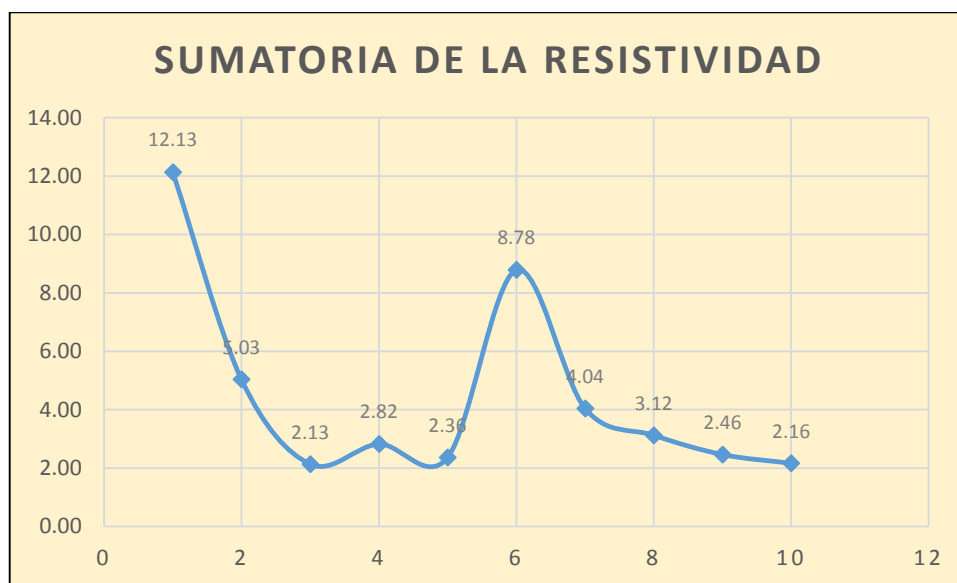
$$\rho_{Ruta\ 2} = \text{Anti Ln}(S \times Z + X) = \text{Anti Ln}(0.09862 \times 0.524411 + 4.07) = 61.68\Omega m$$

En la tabla 8 se muestra que el método de wenner lo dividimos en dos rutas. Ahora lo pondremos en una sola ruta, o sea uniremos la ruta 1 y ruta 2, como se muestra en la siguiente tabla 11.

| Número de medición | Espaciamento en varillas a(m) | Resistencia medida R (W) | Observación | $r = 2paR$ | $X_i = Lnr$ | $(X_i - X_{medio})^2$ |
|---------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|-------------|------------|-------------|-----------------------|
| 1 | 1 | 12.13 | | 76.2 | 4.33 | 0.05 |
| 2 | 2 | 5.03 | | 63.18 | 4.15 | 0.00 |
| 3 | 3 | 2.13 | | 40.13 | 3.69 | 0.17 |
| 4 | 4 | 2.82 | | 70.84 | 4.26 | 0.02 |
| 5 | 5 | 2.36 | | 74.10 | 4.31 | 0.04 |
| 6 | 1 | 8.78 | | 55.14 | 4.01 | 0.01 |
| 7 | 2 | 4.04 | | 50.74 | 3.93 | 0.03 |
| 8 | 3 | 3.12 | | 58.78 | 4.07 | 0.00 |
| 9 | 4 | 2.46 | | 61.80 | 4.12 | 0.00 |
| 10 | 5 | 2.16 | | 67.82 | 4.22 | 0.01 |
| Resistividad Promedio | | 4.50 | Promedio | | 4.11 | 0.03 |
| Cantidad de muestras | | | | | 10 | |
| Suma | | | | 618.71 | 41.09 | 0.34 |
| Desv. Estandar | | | | | 0.18521 | |
| Valor de Z para distribución estandar | | | | | 0.524411 | |
| Resistividad al 70% $r =$ | | | | | 67.08 | W-m |

Tabla 11

En la gráfica 3 se muestra la resistividad de las dos rutas. En la gráfica 4 se observa la resistencia total del terreno.



Grafica 4

3.3.3 Municipio La Paz Centro

DATOS DE SITIO

Fecha de Medición: 25/oct/2017
 Sitio: Estadio
 Ciudad: La Paz Centro
 Proyecto: Medición del Suelo
 Método de Medición: Wenner, con Box Cox

CONDICIONES DEL SUELO

Color del Suelo: Café
 Tipo de Terreno: Ultimo día de lluvia
 Temperatura: No definido
 PH:

DATOS DEL MONTAJE EN EL TERRENO

Área Máxima de Medición:
 Numero de Mediciones: 5
 Profundidad de los Electrodo: 0.20 mts
 Observaciones:



UBICACIÓN DE LOS PUNTOS

| | Norte (x) | Sur (y) |
|----|-----------|---------|
| P1 | 0534741 | 1363728 |
| P2 | 0534706 | 1363661 |
| P3 | 0534767 | 1363621 |
| P4 | 0534823 | 1363693 |

• Datos de Medición

En el departamento de La Paz Centro se utilizó la medición de 4 picas, utilizando el Método de Wenner (Fluke). En la siguiente tabla se muestra los datos obtenidos:

| N. Medición | Mts de cada pica | Fluke | |
|-------------|------------------|--------------------|---------------------|
| | | Ruta1 (Ω) | Ruta 2 (Ω) |
| 1 | 1 | 6.90 | 3.64 |
| 2 | 2 | 2.12 | 1.50 |
| 3 | 3 | 0.74 | 0.70 |
| 4 | 4 | 0.60 | 0.63 |
| 5 | 5 | 0.51 | 0.57 |

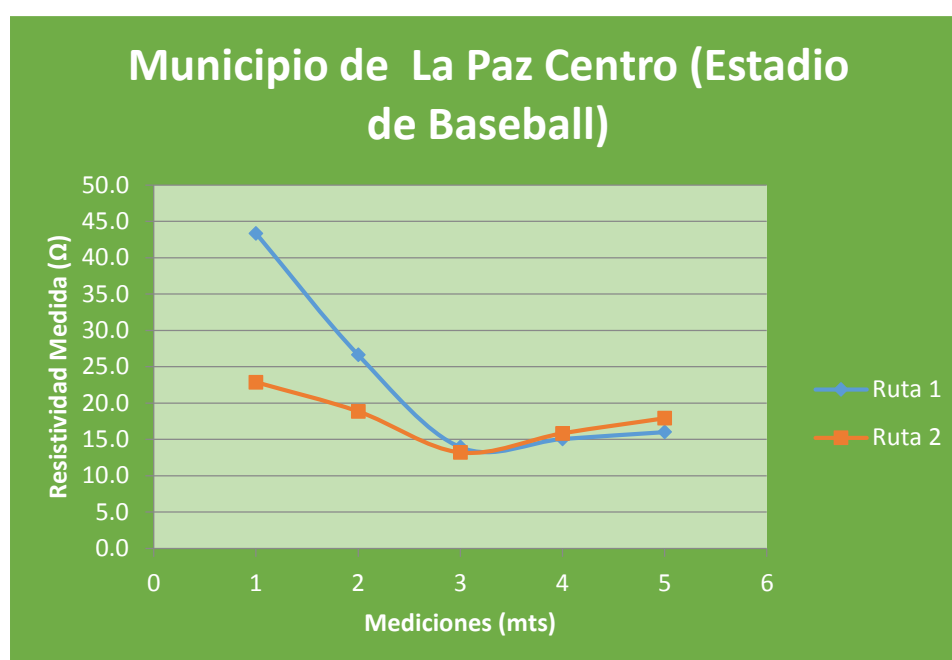
Tabla 12

○ **Método de Wenner (Fluke):**

| N. de Medición | Espaciamiento en Varillas (mts) | Cálculos de la Resistividad ($\rho = 2\pi a R_m$) | |
|----------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------|
| | | Ruta 1 (Ωm) | Ruta 2 (Ωm) |
| 1 | 1 | 43.3 | 22.9 |
| 2 | 2 | 26.63 | 18.84 |
| 3 | 3 | 13.94 | 13.19 |
| 4 | 4 | 15.07 | 15.83 |
| 5 | 5 | 16.01 | 17.90 |
| Total: | | 114.99 | 88.61 |

Tabla 13

En la gráfica 5, se observa las curvas de cada Ruta:



Gráfica 5

Analizando con el método estadístico de BOX COX, primero resolveremos el logaritmo natural de cada medición, para poder obtener una probabilidad del 70% en la campana de Gauss.

| N. de Medición | Espaciamiento de la Varilla | $X_i = \ln \rho$ | | $(X_i - X_{medio})^2$ | |
|-----------------|-----------------------------|------------------|--------------|-----------------------|-------------|
| | | Ruta 1 | Ruta 2 | Ruta 1 | Ruta 2 |
| 1 | 1 | 3.77 | 3.13 | 0.54 | 0.07 |
| 2 | 2 | 3.28 | 2.94 | 0.06 | 0.01 |
| 3 | 3 | 2.63 | 2.58 | 0.16 | 0.08 |
| 4 | 4 | 2.71 | 2.76 | 0.10 | 0.01 |
| 5 | 5 | 2.77 | 2.88 | 0.07 | 0.00 |
| PROMEDIO | | 3.03 | 2.86 | 0.19 | 0.03 |
| SUMA | | 15.17 | 14.29 | 0.93 | 0.17 |

Tabla 14

- Se calcula la desviación estándar:

$$S_{Ruta\ 1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{media})^2}{\eta}} = \sqrt{\frac{0.93}{5}} = 0.43171$$

$$S_{Ruta\ 2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{media})^2}{\eta}} = \sqrt{\frac{0.17}{5}} = 0.18297$$

Donde;

η = número de muestra

La distribución normal se toma Z para 70%, que da 0.524411 (Mirar Anexo, Tabla)

- Hallando la Resistividad:

$$\rho_{Ruta\ 1} = Anti\ Ln(S \times Z + X) = Anti\ Ln(0.43171 \times 0.524411 + 3.03) = 26.07\Omega m$$

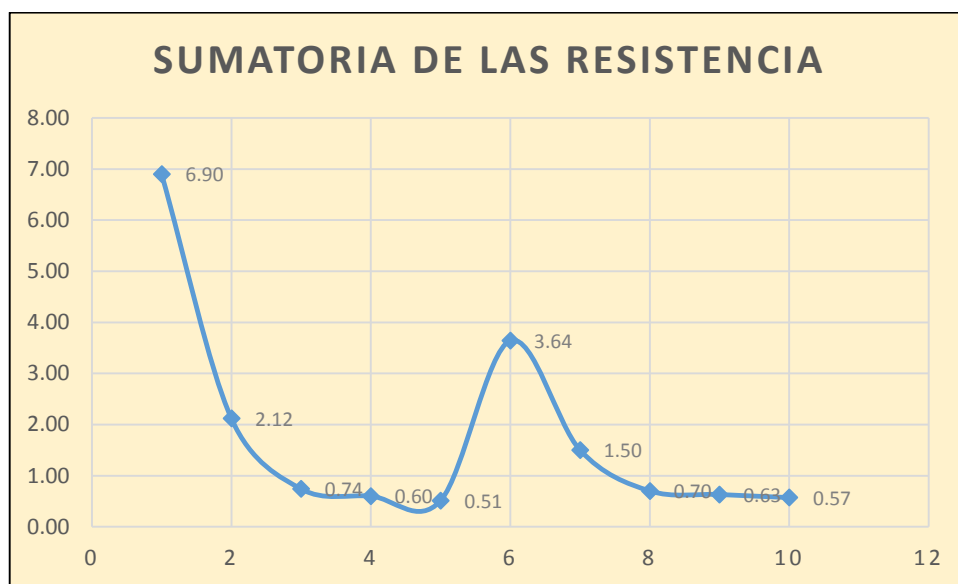
$$\rho_{Ruta\ 2} = Anti\ Ln(S \times Z + X) = Anti\ Ln(0.18297 \times 0.524411 + 2.86) = 19.19\Omega m$$

En la tabla 12 se muestra que el método de wenner lo dividimos en dos rutas. Ahora lo pondremos en una sola ruta, o sea uniremos la ruta 1 y ruta 2, como se muestra en la siguiente tabla 13.

VALOR TOTAL TERRENO DE LA PAZ CENTRO

| Número de medición | Espaciamiento en varillas a(m) | Resistencia medida (W) | R | Observación | r= 2paR | X _i = Lnr | (Xi-Xmedio) ² |
|---------------------------------------|--------------------------------|------------------------|---|-------------|---------|----------------------|--------------------------|
| 1 | 1 | 6.90 | | | 43.3 | 3.77 | 0.68 |
| 2 | 2 | 2.12 | | | 26.63 | 3.28 | 0.11 |
| 3 | 3 | 0.74 | | | 13.94 | 2.63 | 0.10 |
| 4 | 4 | 0.60 | | | 15.07 | 2.71 | 0.05 |
| 5 | 5 | 0.51 | | | 16.01 | 2.77 | 0.03 |
| 6 | 1 | 3.64 | | | 22.86 | 3.13 | 0.03 |
| 7 | 2 | 1.50 | | | 18.84 | 2.94 | 0.00 |
| 8 | 3 | 0.70 | | | 13.19 | 2.58 | 0.13 |
| 9 | 4 | 0.63 | | | 15.83 | 2.76 | 0.03 |
| 10 | 5 | 0.57 | | | 17.90 | 2.88 | 0.00 |
| Resistividad Promedio | | 1.79 | | Promedio | | 2.95 | 0.12 |
| Cantidad de muestras | | | | | | 10 | |
| Suma | | | | | 203.60 | 29.46 | 1.18 |
| Desv. Estandar | | | | | | 0.34305 | |
| Valor de Z para distribución estandar | | | | | | 0.524411 | |
| Resistividad al 70% r = | | | | | | 22.79 | W-m |

En la gráfica 5 se muestra la resistividad de las dos rutas. En la gráfica 6 se observa la resistencia total del terreno.



Grafica 6

Fase 4: Procedimiento guía recomendado
para los Estudios de Resistividad del Suelo
según Normativa de la IEEE – 81-1983

De acuerdo a la práctica realizada durante el desarrollo de esta tesis y basado en los resultados obtenidos, se recomienda seguir el siguiente procedimiento para las mediciones de resistividad de los suelos de Nicaragua:

- 1- Aplicación de la Normativa IEEE-81-1983, para las mediciones de resistividad de los suelos.
- 2.- Utilización del formato de mediciones de resistividad del suelo, desarrollado en estudio de esta tesis.
- 3.- Mediciones de campo de los suelos, aplicando el método de Wenner.
- 4.- Trazado de las trayectorias o rutas de medición a espaciamientos lineales, en dos direcciones.
- 5.-Procesamiento y análisis de las mediciones de campo aplicando el método estadísticos de Box Cox.
- 6.- Informe final de resultados.

RECOMENDACIONES

- Seguir la metodología empleada en el estudio que se hizo para hacer las mediciones correspondientes, para que sea establecida como estándar nacional con el fin de garantizar una medición excelente.
- Proponemos utilizar el método de Wenner para tener una buena medición a tierra, para llevarla a cabo con el método estadístico de Box Cox, con el fin de tener un 70% o más de exactitud, para encontrar la resistividad del terreno.
- Indicar cuantas muestras o mediciones se hicieron en el terreno, y poner la dirección de dichas mediciones.
- A la hora de ser las mediciones, abarcar más del 50% del terreno de medición.
- Es importante destacar, que las mediciones que se vayan a realizar en un terreno sean en tiempo de verano y no en invierno, por el motivo que el suelo esta húmedo y eso afecta las mediciones.
- Para llevar un ordenamiento de los datos de medición, recomendamos que utilicen el formato y hoja de estadística que está en Anexo.
- Es de vital importancia que los estudiantes de ingeniería eléctrica, tengan un conocimiento sobre este tema, para que hagan un buen estudio de la resistividad del terreno.
- Utilizar un GPS, para poner los puntos de coordenadas del Terreno.

CONCLUSIONES

El manual creado para las mediciones de los parámetros de tierra basada en la normativa IEEE-81-1983 se ha concentrado a la práctica y se han obtenido resultados que se esperaban con errores aceptables, garantizando un margen de exactitud del más del 70%. Sin lugar a duda esto no fuera sido posible sin la desviación estándar o conocida también como distribución estándar normal que nos permite obtener el resultado de la campana de Gauss.

En las mediciones que se hicieron en los distintos departamentos dieron como resultados, que el suelo cuando este húmedo no se puede tomar muestra porque afecta en la resistividad del terreno. En Managua se midió en la Universidad Nacional de Ingeniería, y dio una resistividad total del 88.18 Ωm , quedando como suelo limo; según los expertos de INETER la ciudad de Managua está clasificada en suelos limos no cohesivos, arenas y gravas, de pobre a bien consolidados y con diferentes grados de cementación, presentando por lo general bajas densidades y alta porosidad.

Masaya dio 67.08 Ωm , tal manera quedando en Turbas Húmedas, y está bien, porque si bien sabemos este suelo es volcánico y fresco y rico en cosechas. En la paz centro de 22.79 Ωm , así como Managua es Limo, también La Paz Centro. Todo se obtuvo en tabla 1.

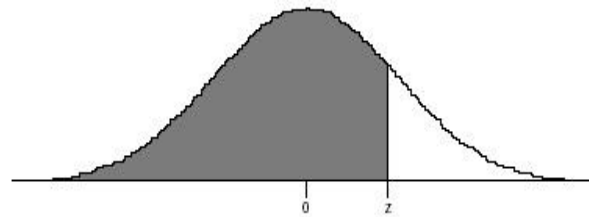
Aun obteniendo esos resultados de la resistividad del terreno si miro que en el método de Box Cox obtuvimos más de 70% de probabilidad para encontrar la resistividad del terreno. Si no fuéramos utilizado este método, las resistividades de la tierra no nos fuera dado tan exacta como obtuvimos.

Con respecto al suelo se clasifican en homogéneo y no homogéneo, quedan los suelos medidos como suelos homogéneos. La gran parte de los suelos en Nicaragua se denomina homogéneo en vista que no ocurrieron grandes efectos geológicos.

Tenemos que tener en cuenta que la resistividad es la recíproca de la conductividad o capacidad del suelo para conducir corriente eléctrica, por lo que es un requisito conocerla para poder calcular y diseñar un sistema de puesta a tierra.

ANEXO

La desviación estándar normal (Z)



| Normal Deviate z | .00 | .01 | .02 | .03 | .04 | .05 | .06 | .07 | .08 | .09 |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| -4.0 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 |
| -3.9 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 |
| -3.8 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 |
| -3.7 | .0001 | .0001 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 | .0000 |
| -3.6 | .0002 | .0002 | .0001 | .0001 | .0001 | .0001 | .0001 | .0001 | .0001 | .0001 |
| -3.5 | .0002 | .0002 | .0002 | .0002 | .0002 | .0002 | .0002 | .0002 | .0002 | .0002 |
| -3.4 | .0003 | .0003 | .0003 | .0003 | .0003 | .0003 | .0003 | .0003 | .0003 | .0002 |
| -3.3 | .0005 | .0005 | .0005 | .0004 | .0004 | .0004 | .0004 | .0004 | .0004 | .0003 |
| -3.2 | .0007 | .0007 | .0006 | .0006 | .0006 | .0006 | .0006 | .0005 | .0005 | .0005 |
| -3.1 | .0010 | .0009 | .0009 | .0009 | .0008 | .0008 | .0008 | .0008 | .0007 | .0007 |
| -3.0 | .0013 | .0013 | .0013 | .0012 | .0012 | .0011 | .0011 | .0011 | .0010 | .0010 |
| -2.9 | .0019 | .0018 | .0018 | .0017 | .0016 | .0016 | .0015 | .0015 | .0014 | .0014 |
| -2.8 | .0026 | .0025 | .0024 | .0023 | .0023 | .0022 | .0021 | .0021 | .0020 | .0019 |
| -2.7 | .0035 | .0034 | .0033 | .0032 | .0031 | .0030 | .0029 | .0028 | .0027 | .0026 |
| -2.6 | .0047 | .0045 | .0044 | .0043 | .0041 | .0040 | .0039 | .0038 | .0037 | .0036 |
| -2.5 | .0062 | .0060 | .0059 | .0057 | .0055 | .0054 | .0052 | .0051 | .0049 | .0048 |
| -2.4 | .0082 | .0080 | .0078 | .0075 | .0073 | .0071 | .0069 | .0068 | .0066 | .0064 |
| -2.3 | .0107 | .0104 | .0102 | .0099 | .0096 | .0094 | .0091 | .0089 | .0087 | .0084 |
| -2.2 | .0139 | .0136 | .0132 | .0129 | .0125 | .0122 | .0119 | .0116 | .0113 | .0110 |
| -2.1 | .0179 | .0174 | .0170 | .0166 | .0162 | .0158 | .0154 | .0150 | .0146 | .0143 |
| -2.0 | .0228 | .0222 | .0217 | .0212 | .0207 | .0202 | .0197 | .0192 | .0188 | .0183 |
| -1.9 | .0287 | .0281 | .0274 | .0268 | .0262 | .0256 | .0250 | .0244 | .0239 | .0233 |
| -1.8 | .0359 | .0351 | .0344 | .0336 | .0329 | .0322 | .0314 | .0307 | .0301 | .0294 |
| -1.7 | .0446 | .0436 | .0427 | .0418 | .0409 | .0401 | .0392 | .0384 | .0375 | .0367 |
| -1.6 | .0548 | .0537 | .0526 | .0516 | .0505 | .0495 | .0485 | .0475 | .0465 | .0455 |
| -1.5 | .0668 | .0655 | .0643 | .0630 | .0618 | .0606 | .0594 | .0582 | .0571 | .0559 |
| -1.4 | .0808 | .0793 | .0778 | .0764 | .0749 | .0735 | .0721 | .0708 | .0694 | .0681 |
| -1.3 | .0968 | .0951 | .0934 | .0918 | .0901 | .0885 | .0869 | .0853 | .0838 | .0823 |
| -1.2 | .1151 | .1131 | .1112 | .1093 | .1075 | .1056 | .1038 | .1020 | .1003 | .0985 |
| -1.1 | .1357 | .1335 | .1314 | .1292 | .1271 | .1251 | .1230 | .1210 | .1190 | .1170 |
| -1.0 | .1587 | .1562 | .1539 | .1515 | .1492 | .1469 | .1446 | .1423 | .1401 | .1379 |
| -.9 | .1841 | .1814 | .1788 | .1762 | .1736 | .1711 | .1685 | .1660 | .1635 | .1611 |
| -.8 | .2119 | .2090 | .2061 | .2033 | .2005 | .1977 | .1949 | .1922 | .1894 | .1867 |
| -.7 | .2420 | .2389 | .2358 | .2327 | .2296 | .2266 | .2236 | .2206 | .2177 | .2148 |
| -.6 | .2743 | .2709 | .2676 | .2643 | .2611 | .2578 | .2546 | .2514 | .2483 | .2451 |
| -.5 | .3085 | .3050 | .3015 | .2981 | .2946 | .2912 | .2877 | .2843 | .2810 | .2776 |
| -.4 | .3446 | .3409 | .3372 | .3336 | .3300 | .3264 | .3228 | .3192 | .3156 | .3121 |
| -.3 | .3821 | .3783 | .3745 | .3707 | .3669 | .3632 | .3594 | .3557 | .3520 | .3483 |



| Espaciamiento "a" (m) | Lectura Perfil 1 R_1 (Ω) | Resistividad calculada ρ (Ωm) $\rho_1 = 2\pi a R_1$ |
|--------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| 1 | | |
| 2 | | |
| 4 | | |
| 6 | | |
| 8 | | |
| 10 | | |
| 16 | | |
| 32 | | |

| Espaciamiento "a" (m) | Lectura Perfil 2 $R_2 (\Omega)$ | Resistividad calculada $\rho (\Omega m)$ $\rho_2 = 2\pi a R_2$ |
|--------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| 1 | | |
| 2 | | |
| 4 | | |
| 6 | | |
| 8 | | |
| 10 | | |
| 16 | | |
| 32 | | |

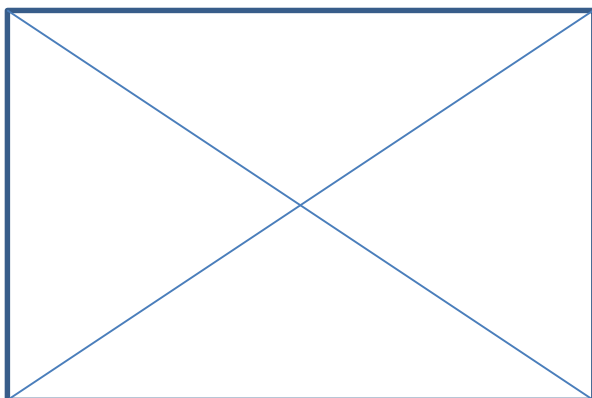
| Espaciamiento "a" (m) | Perfil 1 $\rho_1 (\Omega \cdot m)$ | Perfil 2 $\rho_2 (\Omega \cdot m)$ | Perfil 3 $\rho_3 (\Omega \cdot m)$ | Resistividad promedio $\rho (\Omega \cdot m)$ $\rho = (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3)/3$ |
|--------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | | | | |
| 2 | | | | |
| 4 | | | | |
| 6 | | | | |
| 8 | | | | |
| 10 | | | | |
| 16 | | | | |
| 32 | | | | |

FORMATO DE MEDICION

| DATOS DE SITIO | | CONDICIONES DEL SUELO | |
|---------------------|--|-----------------------|--|
| Fecha de Medición: | | Color del Suelo: | |
| Sitio: | | Tipo de Terreno: | |
| Ciudad: | | Ultimo día de lluvia | |
| Proyecto: | | Temperatura: | |
| Método de Medición: | | PH: | |

| DATOS DEL MONTAJE EN EL TERRENO | |
|---------------------------------|--|
| Área Máxima de Medición: | |
| Numero de Mediciones: | |
| Profundidad de los Electrodo: | |
| Observaciones: | |

IMAGEN DEL TERRENO



PUNTO DE UBICACIÓN

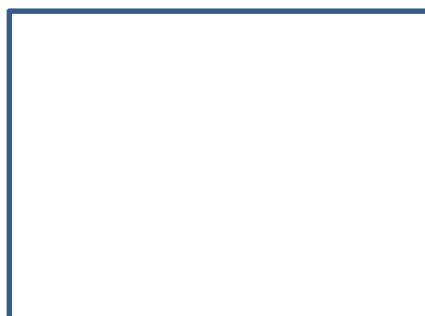
| | Norte (x) | Sur (y) |
|----|--------------|---------|
| P1 | | |
| P2 | | |
| P3 | | |
| P4 | | |

REGISTRO DE LAS MEDICIONES

| Espaciamiento (mts) | Perfil 1 | | Perfil 2 | |
|------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Ruta 1 (Ω) | Ruta 2 (Ω) | Ruta 1 (Ω) | Ruta 2 (Ω) |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |
| | | | | |

| Espaciamiento (mts) | Resistividad Promedia |
|------------------------|--------------------------|
| | |
| | |
| | |
| | |
| | |

DIBUJAR RUTA



FORMATO PARA IR A MEDIR A UNA SUBESTACIÓN

DATOS DEL SITIO

Fecha: _____
 Subestación: _____ Circuito: _____ Poste: _____
 Municipio: _____ Dirección: _____ Barrio/Vereda: _____
 Proyecto: _____ Cliente: _____

DATOS COMPLEMENTARIOS

Responsable de la medida: _____
 Equipo de medida utilizado: _____
 Condiciones del terreno: Seco: _____ Húmedo: _____
 Observaciones del sitio: _____

REGISTROS DE LAS MEDIDAS

| | Perfil 1 | | Perfil 2 | | Perfil 3 | | Resistividad promedio |
|-----------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|----------------|---------------------------|---------------------------------------|
| Espaciamiento "a" (m) | $R_1 (\Omega)$ | $\rho_1 (\Omega \cdot m)$ | $R_2 (\Omega)$ | $\rho_2 (\Omega \cdot m)$ | $R_3 (\Omega)$ | $\rho_3 (\Omega \cdot m)$ | $\rho = (\rho_1 + \rho_2 + \rho_3)/3$ |
| 1 | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | |
| 6 | | | | | | | |
| 8 | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | |
| 16 | | | | | | | |
| 32 | | | | | | | |

NOTAS:

- Para las mediciones de resistividad del suelo debe aplicarse el método de Wenner.
- Los electrodos y placas deben estar bien limpios y exentos de óxido para posibilitar un buen contacto con el suelo.
- Las mediciones deberán realizarse preferiblemente en un periodo seco. No se deben realizar mediciones en condiciones atmosféricas adversas, teniendo en cuenta la posibilidad de ocurrencia de rayos.
- Debe utilizarse calzado y guantes aislados para realizar las medidas.
- De considerarse necesario levantar más perfiles, pueden adicionarse columnas similares y ampliar la anterior.
- Para diseño de puesta a tierras de equipos de distribución (Equipos de transformación, manobra o protección) debe caracterizarse la resistividad como mínimo en dos direcciones perpendiculares, hacia la parte central del terreno.
- Para el diseño de mallas de puesta a tierra de instalaciones industriales, comerciales o residenciales, deben efectuarse medidas que cubran toda el área donde quedará la malla. Como mínimo deberá medirse en dos direcciones perpendiculares hacia la parte central del área del terreno y en dos direcciones o perfiles hacia la periferia, paralelos a los lados del área.
- Se deben descartar los valores de resistividad que tengan una desviación mayor al 50% en relación con su promedio. En este último caso, el promedio correspondiente para cada espaciamiento deberá recalcularse nuevamente.
- Distancias mayores a 32 metros son adoptadas en el caso de diseño de instalaciones de área de de gran tamaño ($> 1000 \text{ m}^2$).

Bibliografía

- Fluke (keeping your world up and running), **Método de Resistividad de Suelos**. Recuperado de: <http://www.fluke.com/fluke/boes/soluciones/resistencia-de-tierra/m%C3%A9todo-de-resistividad-de-suelos>
- Roberto Ruelas Gómez, **Teoría y Diseño de Sistemas de Tierras Según las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) e IEEE**. Recopilado de: <http://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe01.html>
- Normativa MIE BT 039/ MIE BT 0008/ UNE 20-460/ MIE RAT 13/ Recomendaciones UNESA, Instalaciones de Puesta a Tierra. Recopilado de: http://www.upv.es/electrica/material_tecno/Transparencias_PDF/T3/tema3.pdf
- Depósito de Documentos de la FAO, Tema2: El Suelo. Recopilado de: <http://www.fao.org/docrep/006/W1309S/w1309s04.htm>
- Wikipedia, La enciclopedia Libre, Suelo. Recopilado de: <https://es.wikipedia.org/wiki/Suelo>
- Wikipedia, La enciclopedia Libre, Toma de Tierra. Recopilado de: https://es.wikipedia.org/wiki/Toma_de_tierra
- Schneider – Electric, Esquemas de Conexión a Tierra. Recopilado de: http://www2.schneider-electric.com/resources/sites/SCHNEIDER_ELECTRIC/content/live/FAQS/31000/FA31015/es_ES/ECT.pdf
- International Copper Association Mexico. Recopilado de: <http://programacasasegura.org/mx/que-es-y-como-funciona-la-conexion-a-tierra/>
- <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/3870/T42.00%20V297M.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/15850/1/resistencia_a_tierra.pdf